

# Chancen für den bauakustischen Entwurf durch numerische Simulation

Dirk Clasen<sup>1</sup>, Sabine Langer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> TU Braunschweig, Institut für Angewandte Mechanik, 38106 Braunschweig, Deutschland, Email: d.clasen@tu-bs.de

<sup>2</sup> TU Clausthal, Institut für Technische Mechanik, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Deutschland, Email: s.langer@tu-clausthal.de

## Einleitung

Der Schutz des Menschen vor Lärm gewinnt in der heutigen Zeit immer mehr an Bedeutung, wodurch sich die schallschutztechnischen Anforderungen an einen Entwurf deutlich erhöhen. Allerdings wird diesen Anforderungen häufig erst in einem zu späten Planungsstadium Rechnung getragen. Somit müssen viele Menschen unter akustisch nicht zufriedenstellenden Bedingungen leben oder die Situation nachträglich durch kostspielige Sanierungsmaßnahmen verbessert werden.

Die Entwicklung geeigneter numerischer Werkzeuge, mit denen realitätsnahe Prognosen der akustischen Eigenschaften von Gebäuden bereits in einem frühen Planungsstadium bestimmt werden können, stellt eine Möglichkeit dar, diesen Missstand zu beheben. Ein Planer wäre mit Hilfe eines solchen Werkzeugs im Stande, frühzeitig und somit kostengünstig Probleme zu erkennen und diese konstruktiv zu beheben. Ein derartiges Werkzeug muss die komplexen Mechanismen der Schallausbreitung in und der Schalltransmission durch verschiedene Materialien und Baustoffe realitätsnah abbilden können.

Für bauakustische Problemstellungen sind daher die in der Raumakustik verbreiteten Methoden wie z.B. die Spiegelquellenmethode oder das Strahlenverfolgungsverfahren weniger geeignet, da diese Verfahren die Interaktion von Luft und Struktur nicht berücksichtigen und die Ausbreitung des Schalls im Medium Luft im Vordergrund steht. Im folgenden Beitrag sollen verschiedene Verfahren, die derzeit für bauakustische Fragestellungen eingesetzt werden, vorgestellt und auf ihre Eignung hin bewertet werden. Als Anwendungsbeispiel für die Finite Elemente Formulierung [3] wird eine zweischalige Gipskartonwand untersucht, in deren Hohlraum verschiedene poröse Materialien eingebracht werden.

## Statistische Energieanalyse

Die Statistische Energieanalyse (SEA) basiert auf dem Prinzip der Energieerhaltung [1]. Das Gesamtsystem wird in einige wenige Subsysteme aufgeteilt, zwischen denen der Austausch von Energie unter Berücksichtigung der in die Systeme eingetragenen sowie der von den Systemen dissipierten Energien erfolgt. Die vorhergesagte Größe der SEA ist sowohl ein räumlicher als auch ein zeitlicher Mittelwert der Schwingungsenergie in einem Frequenzband.

Die SEA eignet sich besonders für die Behandlung von reinen Körperschall- sowie Fluid-Struktur-Interaktionsproblemen in höheren Frequenzbereichen, in denen die Modendichte ausreichend groß ist. Durch die Aufteilung des betrachteten Systems in verhältnismäßig

grobe Subsysteme ist der numerische Aufwand dieses Verfahrens, verglichen mit den Diskretisierungsverfahren, gering. Das Verfahren ermöglicht desweiteren ein einfaches und schnelles Auffinden von Schwachstellen in der Konstruktion [5]. Allerdings kann nur eine schwache Kopplung der Subsysteme berücksichtigt werden und es sind keine Aussagen über lokale Schalldruckverteilungen möglich, wodurch keine detaillierten Aussagen zum lokalen Verhalten von Bauteilen gemacht werden können.

## Diskretisierungsverfahren

Den Diskretisierungsverfahren liegt im Gegensatz zur SEA eine differentielle Beschreibung der mechanischen Problemstellung zugrunde, wodurch der Wellencharakter des Schalls und alle daraus resultierenden Phänomene abgebildet werden können. Die am häufigsten für akustische Fragestellungen angewendeten Diskretisierungsverfahren sind die Randelementmethode und die Finite Elemente Methode (FEM).

Die FEM ist für strukturmechanische Fragestellungen sehr verbreitet. In der Akustik ist sie insbesondere dann geeignet, wenn die Interaktion zwischen schwingenden elastischen Strukturen und die sie umgebenden abgeschlossenen Fluidgebieten betrachtet werden soll. Um solche Interaktionsprobleme zu behandeln, sind die FEGleichungen für die elastische Struktur und das akustische Fluid geeignet zu koppeln [3].

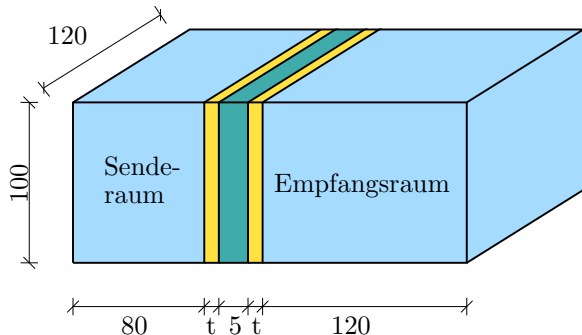
Die reine FEM ist auf die Behandlung sogenannter Innenraumprobleme beschränkt, da durch die Gebietsdiskretisierung die Sommerfeldsche Abstrahlbedingung verletzt wird. Allerdings kann diese Abstrahlbedingung durch zusätzliche Maßnahmen erfüllt werden [4].

Die Randelementmethode eignet sich besonders zur Untersuchung solcher Außenraumprobleme, da das Verfahren implizit die Sommerfeldsche Abstrahlbedingung erfüllt und die Schallwellen somit im Unendlichen auslaufen. Da im Gegensatz zur FEM nur der Rand des Gebiets zu diskretisieren ist, wird die Dimension des Problems um eins reduziert. Allerdings ergeben sich bei der Randelementmethode i.d.R. vollbesetzte Gleichungssysteme, die der FEM hingegen sind nur dünn besetzt. Desweiteren wird in der Randelementmethode eine Fundamentallösung benötigt, die jedoch nicht für alle Problemklassen vorliegt. Dadurch wird die Anwendbarkeit der Methode deutlich eingeschränkt. Die FEM hingegen kann einfach um komplexe Materialgesetze erweitert und für die Analyse inhomogener Bauteile angewendet werden [2]. Beide Verfahren eignen sich jedoch nur für niedrige Frequenzen, da mindestens 6 Elemente je Wellenlänge benötigt werden, um eine hinreichend genaue Lösung zu

erhalten. Die Gleichungssysteme, die aus der FEM entstehen sind zudem vor allem für höhere Frequenzen indefinit, wodurch die effiziente Lösung erschwert wird. In neuerer Zeit sind jedoch zahlreiche Verfahren entwickelt worden, die versuchen, diese Probleme zu lösen [4].

## Anwendungsbeispiel

Eine zweischalige Gipskartonwand (vgl. Abbildung 1) soll für verschiedene in den Hohlraum eingebrachte Materialien untersucht werden. Die zwei Gipskartonwände ( $E = 3.0 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ ,  $\nu = 0.15$ ,  $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$ ,  $\eta = 0.005$ ,  $t = 1.25 \text{ cm}$ ) haben einen Abstand von 5 cm. In [3] wurde die verwendete FE-Formulierung präsentiert. Die Modellierung des porösen Materials im



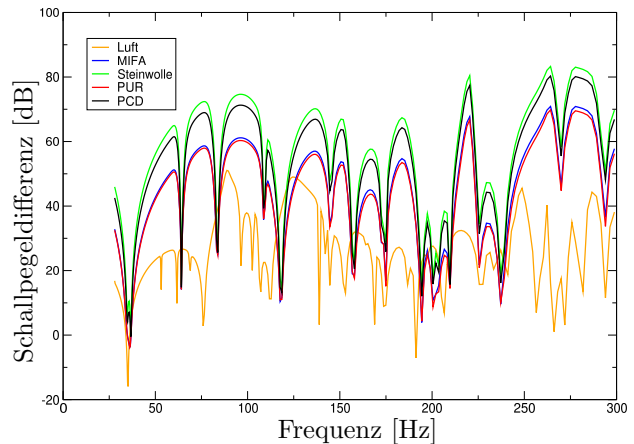
**Abbildung 1:** Zweischalige Gipskartonwand, in deren Zwischenraum verschiedene Materialien eingebracht werden. Alle Abmessungen in cm.

Hohlraum erfolgt mit Hilfe des äquivalenten Fluidansatzes nach Champoux et al. [6]. Dieser Ansatz ermöglicht die Berücksichtigung poröser Materialien durch eine kleine Modifikation der FE-Formulierung für das Fluidgebiet. Die Wellenzahl  $k$  wird durch den Quotienten aus der frequenzabhängigen effektiven Dichte  $\rho_e$  und dem ebenfalls frequenzabhängigen Kompressionsmodul  $K_e$  ersetzt. Diese zwei Effektivwerte werden aus dem Strömungswiderstand  $R_L$ , der Porosität  $\phi$ , einem Strukturfaktor  $\alpha_\infty$  sowie zwei Porenformfaktoren  $s_v$  und  $s_t$  berechnet. In Tabelle 1 sind diese Parameter für einige Materialien zusammengestellt. In Abbildung 2 ist die

Material	$\phi$	$\alpha_\infty$	$R_L$	$s_v$	$s_t$
Mineralfaser	0.95	1.40	25000	1.0	1.0
Steinwolle	0.94	2.10	135000	0.5	0.3
Polyurethan	0.90	7.80	25000	1.0	1.0
Polycarbodiimid	0.97	2.52	87000	1.8	0.3

**Tabelle 1:** Materialparameter zur Bestimmung der effektiven Dichte  $\rho_e$  und des effektiven Kompressionsmoduls  $K_e$

Schallpegeldifferenz für vier in den Hohlraum eingebrachte poröse Materialien dargestellt. Als Referenzwert dient die Schallpegeldifferenz eines mit Luft gefüllten Hohlraumes. Wie zu erwarten steigt die Schallpegeldifferenz durch das Einbringen von porösem Material in den Hohlraum deutlich an. Die Mineralfaser (MIFA) und das Polyurethan (PUR) zeigen nahezu das gleiche Verhalten, während das Polycarbodiimid (PCD) die Schallpegeldif-



**Abbildung 2:** Schallpegeldifferenz über der Frequenz für verschiedene in den Hohlraum eingebrachte Materialien

ferenz nochmals verbessert. Die Steinwolle zeigt das beste Verhalten aller vier Materialien. Es wird ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen dem Strömungswiderstand  $R_L$  und der Schallpegeldifferenz deutlich: je höher  $R_L$  desto höher die Schallpegeldifferenz. Die übrigen Materialparameter haben keinen großen Einfluss auf das Ergebnis, wie man am Vergleich zwischen PUR und MIFA sehen kann.

## Zusammenfassung

Im vorliegenden Artikel wurden verschiedene numerische Verfahren für bauakustische Fragestellungen vorgestellt und bezüglich ihrer Eignung und Anwendbarkeit bewertet. Als Anwendungsbeispiel wurde eine zweischalige Gipskartonwand analysiert, in deren Hohlraum verschiedene poröse Materialien eingebracht wurden. Es konnte gezeigt werden, dass für den verwendeten äquivalenten Fluidansatz nach Champoux et al. [6] ein direkter Zusammenhang zwischen der Schallpegeldifferenz und dem Strömungswiderstand des porösen Materials besteht.

## Literatur

- [1] R.H. Lyon, G. Maidanik. Power flow between linearly coupled oscillators. *Journal of the Acoustical Society of America* **34**, 1962, 623–639
- [2] O.C. Zienkiewicz, R. L. Taylor. *The finite element method*. McGraw-Hill, 1989
- [3] D. Clasen, S. Langer, M. Schanz. Efficient Simulation of Sound Insulation in Building Acoustics. *Fortschritte der Akustik DAGA '04*, 2004, 303–304
- [4] L.L. Thompson, P.M. Pinsky. *Acoustics. Encyclopedia of Computational Mechanics Vol. 2* Chap. 22, 2004, 695–717
- [5] R.J.M. Craik. *Sound transmission through buildings: using statistical energy analysis*. 1996. Aldershot, Hampshire, England
- [6] Y. Champoux, J.-F. Allard. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *Journal of Applied Physics* **70**(4), 1991, 1975–1979