

Raumakustische Simulation mit mathematischen und physikalischen Modellen

– Eine Einführung in das Vorkolloquium sowie kurzes Resümee –

W. Leschnik

Arbeitsbereich Bauphysik und Werkstoffe im Bauwesen, Technische Universität Hamburg-Harburg

1 Allgemeines

Die raumakustische Simulation dient bei geplanten Räumen der Sicherstellung und bei vorhandenen Räumen der Verbesserung bestimmter akustischer Eigenschaften der Räume. Dabei erhält man Informationen über einzelne raumakustisch relevante Parameter wie Nachhall, Diffusität, Richtungsverteilung, Echos, Schallversorgung usw. Es bietet sich aber auch die Möglichkeit des „Hineinhörens“ in geplante Räume (Auralisierung).

Mehr als ein Jahrhundert lang fanden ausschließlich physikalische Modelle Anwendung. Dabei werden akustischen Messungen in einem Modell durchgeführt, das entsprechend dem Original im verkleinerten Maßstab nachgebaut wird. Seit ca. 30 Jahren wird zunehmend an der Entwicklung mathematischer Modelle gearbeitet, bei denen das Original am Rechner virtuell modelliert und eine Schallausbreitung simuliert wird.

2 Physikalische Modelle

Zur physikalischen Modellierung eignen sich verschiedene Verfahren. Optische Modelle liefern eher qualitative Aussagen zu Strahlengängen, Spiegelungen, Diffusität und Energieverteilung. Akustische Modelle mit Wassertank oder Anwendung schlierenoptischer Verfahren können nur eine zweidimensionale Wellenausbreitung simulieren und bringen eher qualitative Aussagen zur Wellenausbreitung und zur Wellenbeugung. Zuverlässige, quantitative Aussagen zu raumakustischen Parametern lassen sich nur mit Modellen erzielen, in denen eine dreidimensionale Luftschallausbreitung stattfindet. Hier ein kleiner geschichtlicher Rückblick:

Jahr	Autor u. Quelle	Inhalt
1825	SAVERT [1]	Modellgesetze
1843	RUSSEL [2]	Modelluntersuchungen mit Wassertank
1912	SABINE [3]	Modelluntersuchungen mit Schlierentechnik
1934	SPANDÖCK [4]	Abhandlung über Modellversuche, Auralisierung durch „Spandöck'sche Verfahren“

Der Modellmaßstab reicht bei raumakustischen Untersuchungen an dreidimensionalen Modellen etwa von 1:4 bis 1:25. Da das Verhältnis von Längenabmessung zu Schallwellenlänge bei der Modellierung konstant bleiben muß, ergibt sich, daß proportional zum Modellmaßstab die Meßfrequenzen im Modell ansteigen müssen. Die Herstellung der Modelle ist mit einem gewissen Aufwand verbunden, da die absorbierenden Eigenschaften der Modellmaterialien bei den Modellfrequenzen denen der Originalmaterialien bei den Originalfrequenzen entsprechen müssen, und dies möglichst auch bezüglich der Abhängigkeit vom Schalleinfallswinkel. Problematisch ist, daß die Luftabsorption nicht, wie für eine korrekte Modellierung erforderlich, linear mit der Frequenz ansteigt, sondern nichtlinear, ja fast quadratisch. Vermeiden läßt sich dieser Effekt durch eine Trocknung der Luft auf 2-3% r. F. oder durch Verwendung von Stickstoff im Modell anstelle von Luft. Rechnerisch korrigieren läßt sich der Einfluß der Luftabsorption auch durch eine laufzeitabhängige Korrektur, wenn Schallimpulse verwendet werden.

Eine Möglichkeit zum „Hineinhören“ in einen geplanten Raum hat SPANDÖCK aufgezeigt [4]. Wie in Bild 1 dargestellt, erfolgt eine trockene Tonaufnahme auf einen Tonträger, hier als Phonograph dargestellt, mit Normalgeschwindigkeit. Anschließend wird die Tonaufnahme mit einer Walzengeschwindigkeit, die entsprechend dem Maßstabsfaktor des Modelles erhöht wurde, in das Modell abgespielt und von dort mit erhöhter Geschwindigkeit wieder aufgezeichnet. Bewegt man die Walze nun mit normaler Geschwindigkeit, dann kann man das durch den Raumeinfluß veränderte Signal abhören. Der obere Grenzfrequenz der Tonträger, auch der von modernen Tonbandgeräten, die durch den Modellfaktor dividiert werden muß, schränkt den Hörgenuß und die Beurteilungsmöglichkeiten allerdings erheblich ein.

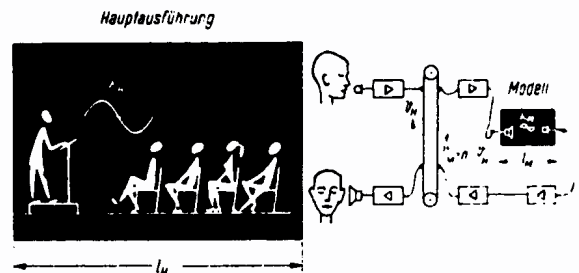


Bild 1: Prinzip der „SPANDÖCK'schen Methode“ zur Auralisierung [4]

Eine Auralisierung kann aber auch mittels Rechner unter Verwendung der Raumimpulsantwort erfolgen, die im Modellraum meßtechnisch ermittelt wurde. Dabei wird der vorgenannte Nachteil vermieden.

Bis heute wurde eine erhebliche Entwicklungsarbeit geleistet. Modellschallquellen für Sprecher, Einzelinstrumente, Gruppen, Orchester und Lautsprecher wurden entwickelt, ebenso Modellschallempfänger, darunter auch Miniaturköpfe mit zwei Mikrofonen, weiterhin Modellmaterialien für Wände, Decken, Brüstungen, Bodenbeläge, Vorhänge, Publikumsflächen, Reflektoren, Diffusoren usw., geeignete Meßapparaturen und Auswerteinrichtungen sowie Maßnahmen zur Kompensation der Luftabsorption.

Mit physikalischen Modellen sind zuverlässige, quantitative Aussagen zu verschiedenen Raumeigenschaften möglich, wobei alle Ausbreitungsphänomene, auch die wellentheoretischen, berücksichtigt werden. Auch ist eine Auralisierung mit den erläuterten Methoden möglich. Der Aufwand für die Modellherstellung ist jedoch nicht unerheblich. Auch bedarf die Anwendung der Modellmeßtechnik erheblicher meßtechnischer und raumakustischer Erfahrung.

3 Mathematische Modelle

Mathematische Methoden basieren meist auf der Anwendung von Strahlverfolgungsmethoden und Spiegelquellenmethoden (Schallstrahlen oder Schallteilchen). Eine der ersten Veröffentlichungen zur Anwendung von einer Strahlverfolgungsmethode für raumakustische Untersuchungen erfolgte 1968 durch KROKSTAD [5].

Seitdem wurden vielerorts Rechenprogramme zur mathematischen Modellierung entwickelt. Die Programme wurden,

angelehnt an die Entwicklung der Rechnertechnik immer aufwendiger, die Simulation immer genauer. Zudem eröffnete sich die Möglichkeit zur Auralisierung, auch binaural, allein mittels Rechner.

Wesentliches Problem von Schallstrahlen- und Spiegelquellenmethoden ist, daß sie nur die geometrische und die statistische Raumakustik berücksichtigen. Die wellentheoretische Raumakustik, die insbesondere Einfluß auf die Schallausbreitung bei tiefen Frequenzen hat, bleibt außen vor. Abhilfe schafft der zusätzliche Einsatz von FEM- und BEM-Methoden (hybride Verfahren).

Auch auf dem Gebiet der mathematischen Modellierung wurde bislang eine erhebliche Entwicklungsarbeit geleistet. So wurden Absorptiondaten für Wände, Bodenbeläge, Absorber, Reflektoren, Diffusoren usw. in Abhängigkeit von der Frequenz und vom Einfallswinkel ermittelt, ebenso Schallquellendaten für Sprecher, Instrumente, Orchester, Lautsprecher usw., weiterhin Empfängerdaten, wie z. B. die Außenübertragungsfunktion, und schnelle Algorithmen zur Erzielung akzeptabler Rechenzeiten.

Mathematische Modelle ermöglichen eine Simulation der Schallausbreitung sowie eine Auralisation. Sie liefern quantitative Aussagen zu den Raumeigenschaften wie Nachhall, Diffusität, Richtungsverteilung, Schallversorgung usw. Die Modellerstellung mittels Rechner ist jedoch mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden, wenn alle wesentlichen Details eines Raumes berücksichtigt werden. Die Entwicklungsarbeit bei der Bestimmung der Material- und Quellendaten ist nicht abgeschlossen. Die Entwicklung der hybriden Verfahren zur hinreichenden Simulation des Raumverhaltens bei tiefen Frequenzen steht erst am Anfang.

4 Ziel des Kolloquiums

Sowohl physikalische als auch mathematische Modelle sind für die raumakustische Simulation geeignet. Beide ermöglichen umfangreiche quantitative Aussagen zu den akustischen Eigenschaften von Räumen. Welche Zukunftsaussichten haben sie jedoch?

Im Jahre 1989 schloß der Autor einen Vortrag, den er auf Einladung der Koreanischen Akustischen Gesellschaft zum Thema „Akustische Modellmeßtechnik“ in Seoul hielt, mit folgenden Worten [6]:

„Auch wenn zu erwarten ist, daß in Zukunft die physikalische Modellierung mehr und mehr durch mathematische Modellierung ersetzt werden wird, so wird dennoch die physikalische Modellierung weiterhin ihren festen Platz in der Akustik haben.“

Ziel dieses Vorkolloquiums ist es, eine Standortbestimmung vorzunehmen, festzustellen, ob die 1989 gemachte Aussage noch Gültigkeit hat, festzustellen, welchen Standort die klassischen physikalischen Verfahren und welchen die modernen mathematischen Verfahren heute haben, festzustellen, was in der Zukunft von diesen Verfahren zu erwarten ist. Um diese Fragen zu klären, diese Standortbestimmung vorzunehmen, wurden eine sieben Autoren eingeladen, die sich seit längerem mit der physikalischen oder/und der mathematischen Modellierung befassen und verschiedene Aspekte der Modellierung beleuchten werden.

5 Literatur

[1] Savert F.: Nouvelle recherches sur les vibrations de l'air. Annales de Chimie et de Physique, 29 (1825).

- [2] Russel S.: B. A. Report, 96 (1843)
- [3] Sabine W. C.: Collected Papers on Acoustics. Harvard University Press (1922), reprinted by Dover, New York (1964).
- [4] Spandöck F.: Akustische Modellversuche. Annalen der Physik, 5. Folge, Bd. 20, Heft 4 (1934)
- [5] Krokstad A., S. Ström und S. Sørsdal: Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. Journal of Sound and Vibration, Vol. 8 (1968).
- [6] Leschnik W.: Acoustic Scale Modelling. Conference on Vibration and Noise Control, Seoul (1989).

6 Resümee nach Durchführung des Kolloquiums

Die physikalische Modellierung findet noch an zahlreichen Stellen Anwendung. Sie ermöglicht umfassende Aussagen zu den akustischen Eigenschaften von Räumen, sowohl in dem Sinne, daß statistische, geometrische und wellentheoretische Raumakustik berücksichtigt werden, als auch dahingehend, daß praktisch alle raumakustisch relevanten Parameter bestimmbar sind. Sie setzt allerdings neben hinreichenden raumakustischen Kenntnissen gute meßtechnische sowie materialtechnische Kenntnisse und Erfahrungen voraus. Allerdings befassen sich jüngere Wissenschaftler zunehmend ausschließlich mit der mathematischen Modellierung. Gehen die Kenntnisse derjenigen, die derzeit noch physikalische Modellmeßtechnik betreiben, mit ihrem Ausscheiden aus der Berufswelt mehr oder mehr verloren, dann besteht die Gefahr, daß die physikalische Modellierung trotz ihrer Vorteile mehr und mehr in Vergessenheit gerät.

Die mathematische Modellierung hat in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht. Die Entwicklung hybrider Verfahren in Verbindung mit effizienten Algorithmen und leistungsfähigen Rechnern bewirkt, daß die Simulationsergebnisse zunehmend genauer werden. Round-Robin-Tests tragen dazu bei, die verschiedenen Programme zu validieren. An der Zusammenstellung von Datenkatalogen für Materialien und Schallquellen wird gearbeitet. Die Leistungsfähigkeit moderner Rechner ermöglicht zudem eine Auralisierung, die insbesondere dort, wo es um die Demonstration von raumakustischen Maßnahmen geht, besonders beliebt ist.

Noch stellen die mathematischen Modelle trotz des nicht zu unterschätzenden Aufwandes jedoch keinen umfassenden Ersatz für die physikalischen Modelle dar. Aber die Bemühungen laufen auf Hochtouren. Ob die physikalische Modellierung von der mathematischen Modellierung vollkommen ersetzt werden wird, hängt sicherlich davon ab, wie genau sie einerseits die Realität wiedergeben können und wie handhabbar die Rechenprogramme andererseits sein werden. Die Gefahr, bei der Anwendung mathematischer Modellierung Rechenergebnissen ohne ausreichend kritische Prüfung Glauben zu schenken, darf nicht übersehen werden.

Letztlich wird der Anwender entscheiden, welche Art der Modellierung in welchem Falle Verwendung finden wird.

7 Danksagung

Der Autor dankt als Leiter des Vorkolloquiums an dieser Stelle den Vortragenden noch einmal für Ihre Bereitschaft, sich aktiv an diesem Vorkolloquium zu beteiligen. Sie haben es ermöglicht, daß die gestellte Thematik sachkundig und in großer Tiefe behandelt werden konnte.