

Grundlagen raumakustischer Rechenverfahren und ihre Validierung

O. Schmitz, M. Vorländer, Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen, 52056 Aachen
S. Feistel, W. Ahnert, ADA - Acoustic Design Ahnert, Berlin

Einleitung

Raumakustische Simulationsprogramme nehmen als Werkzeug des beratenden Akustik-Ingenieurs einen immer höheren Stellenwert ein. Der Nutzen dieser Programme steht und fällt aber mit der Qualität und der Verlässlichkeit der gelieferten Ergebnisse. Diese sind natürlich von verschiedenen Faktoren abhängig. Neben der Qualifikation des Benutzers, die eine notwendige Voraussetzung für eine sinnvolle Anwendung solcher Systeme ist, sind die zugrundeliegenden akustischen Modelle und deren Umsetzung in Algorithmen entscheidend. Im Rahmen dieses Beitrags werden daher zunächst die Grundlagen der raumakustischen Simulation kurz zusammengefaßt. Damit werden den Anwendern die notwendigen Entscheidungskriterien für die Bewertung der Simulationsergebnisse an die Hand gegeben. Anschließend wird über die Integration des am Institut für Technische Akustik in den letzten 15 Jahren entwickelten Simulationsprogramms in eine elektroakustische Simulationssoftware berichtet.

Dank der von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig in den letzten Jahren durchgeführten Ringvergleiche stehen sowohl Messungen als auch Simulationsdaten für zwei Räume verschiedener Größe zur Verfügung. Mit Hilfe dieser Daten können raumakustische Simulationsprogramme validiert werden. Zur Verifikation des neu implementierten Raumakustikmoduls gegenüber den bisherigen Ergebnissen und insbesondere gegen akzeptierte Meßergebnisse werden daher die Daten der PTB-Räume verwendet.

Raumakustische Computersimulation

Kenntnisse über die grundlegenden Voraussetzungen der Simulationsalgorithmen sind für eine sinnvolle Bedienung raumakustischer Simulationsprogramme und für die Interpretation ihrer Ergebnisse unerlässlich. Daher sollen diese hier noch einmal kurz zusammengefaßt werden.

Für alle Rechenmodelle die auf geometrischer Akustik basieren gilt :

Die Abmessungen des Raumes müssen groß sein verglichen mit der Wellenlänge. Welleneffekte wie Beugung oder Resonanzen dürfen im Raum in dem betrachteten Frequenzbereich keine (große) Rolle spielen.

Typische Methoden der geometrischen Akustik (Spiegelquellen, Schallteilchen) können zwar teilweise Phaseneffekte durch Laufzeit und Reflexionsvorgänge und damit verbunden Interferenzen berücksichtigen, aber nur näherungsweise korrekt für Reflexionen 1. Ordnung. Moden (Eigenschwingungen) in Räumen können mit der geometrischen Akustik nicht berechnet werden.

Die Ausbreitung des Schalles wird durch Schallteilchen beschrieben, die sich entlang gerader auf den Wellenfronten senkrecht stehenden Linien bewegen. Die Intensität der Strahlen verhält sich proportional zu $1/r^2$ bzw. $1/t^2$.

Trifft ein Teilchen auf eine Begrenzungsfläche wird ein Teil der nicht absorbierten Energie spiegelnd reflektiert ein anderer in Abhängigkeit vom Streugrad diffus gestreut. Um eine exponentielle Teilchenvermehrung zu vermeiden, werden die gestreuten Anteile geeignet statistisch behandelt. Die Streucharakteristiken haben im allgemeinen eine komplizierte Struktur, in der Simulation wird aber oft eine einfachere

Charakteristik zum Beispiel nach dem Lambert'schen Gesetz verwendet. Die Erfahrung zeigt, daß diese vereinfachte Annahme bei der Berechnung der raumakustischen Parameter nur zu geringen Fehlern führt, der Aufwand reduziert sich dadurch aber erheblich. Oft liegen ohnehin keine Messungen vor. Es gibt allerdings Veröffentlichungen [1], die den Einfluß der Streucharakteristik auf die Ergebnisse der Auralisation untersuchen und für Hörerpositionen nahe an einer streuenden Wand von geringen aber wahrnehmbaren Unterschieden berichten.

Die Berechnung erfolgt üblicherweise in Terz- oder Oktavbändern, unter der Annahme, daß die für diesen Frequenzbereich berechneten Werte das Verhalten innerhalb dieses Bereiches hinreichend gut beschreiben. Das ist aber nur dann der Fall, wenn sich das betrachtete Band innerhalb des statistisch beschreibbaren Teils der Übertragungsfunktion befindet. Mit anderen Worten: Das Verhalten innerhalb des Frequenzbereiches darf nicht von einzelnen Raummoden bestimmt werden. Vielmehr müssen sich bei jeder Frequenz hinreichend viele Moden überlappen, so daß lediglich der energetische Mittelwert eine Rolle spielt. Diese Forderung ist nach Schroeder [2] für Frequenzen oberhalb von $f=2000\sqrt{T/V}$ erfüllt, wobei T die Nachhallzeit und V das Volumen des Raumes ist. Aus dem gleichen Grund können keine Aussagen für monofrequente Signale gemacht werden. Für solche Signale ist die Feinstruktur der Übertragungsfunktion relevant, daher kann es zu erheblichen Abweichungen vom mittleren statistischen Verhalten kommen. Die Rechnung gilt also nur für breitbandige (transiente) Signale.

Weitere Einflußfaktoren

Ein Raummodell darf nur die akustisch relevanten Details der Geometrie enthalten. Diese Forderung konkurriert oft mit den visuellen Anforderungen an das Modell. Strenggenommen müssen frequenzabhängige Modelle verwendet werden, die in Abhängigkeit von der Wellenlänge definiert sind. Treppenstufen sind z.B. für tiefe Frequenzen durch eine nahezu spiegelnd reflektierende Ebene zu ersetzen, im mittleren Frequenzbereich ergibt sie eine komplizierte Streucharakteristik, die unter Umständen auch auf einer einzelnen Ebene modelliert werden kann. Für hohe Frequenzen sind die einzelnen Flächen der Stufen zu modellieren.

Natürlich sind auch die akustischen Randbedingungen eine Fehlerquelle. Neben den zumindest aus Tabellenbüchern bekannten Absorptionsgraden stellen insbesondere die Streugrade ein Problem dar. Hier verspricht aber die Einführung einer neuen ISO-Norm zur Messung der Streugrade für allseitigen Schalleinfall Abhilfe. Die Nachbildung der Streueigenschaften der Publikumsbereiche, die Schallquellendaten insbesondere bei verteilten Quellen wie Orchestern und nicht zuletzt der Einfluß der Statistik seien hier nur genannt.

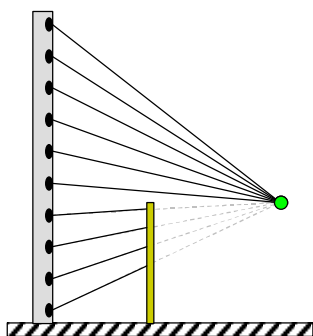
Im verwendeten Raumakustik-Simulationsprogramm wird keinerlei Extrapolation der Impulsantworten z.B. unter Verwendung einer Diffusfeldannahme oder einer aus dem frühen Bereich erstellten Statistik durchgeführt. Damit können auch lange, flache und gekoppelte Räume zuverlässig berechnet werden. Für die Auralisation werden die frühen Reflexionen durch hybride Spiegelquellen (Grenzordnung wählbar 10-20), der frühe gestreute und der Nachhallbereich mit raytracing bis zur vorgegebenen Impulsantwortlänge berechnet.

Directivity DLL

Auf einen Aspekt der Zusammenarbeit zwischen ITA und ADA soll an dieser Stelle besonders eingegangen werden, die Modellierung der Richtcharakteristiken von Schallsendern in Form einer Windows DLL. Ähnlich wie in dem von Dalenbäck publizierten DLL Directivity Interface (DDI) [3] besteht mit dieser DLL die Möglichkeit, die Richtcharakteristiken von Schallquellen abstandsabhängig in beliebiger Winkel- und Frequenzauflösung zu modellieren. Damit können insbesondere Lautsprecherzeilen oder Arrays mit einem ausgeprägten Nahfeld, die eventuell sogar DSP gesteuert sind, realistisch nachgebildet werden. Vorausgesetzt man findet ein geeignetes mathematisches Modell lassen sich auch die gerade besonders populären Zylinderwellenstrahler nachbilden. Der große Vorteil dieses Vorgehens liegt in der Tatsache begründet, daß nicht mehr, wie bisher üblich, lediglich eine Fernfeldmessung in einem festen Winkelraster verwendet wird. Vielmehr können die Zusammenhänge innerhalb der Zeile, des Arrays etc. algorithmisch beschrieben werden, vorausgesetzt ein entsprechendes Modell steht zur Verfügung. Es bleibt dem Implementierenden dabei freigestellt, wie er z.B. die Abstandsabhängigkeit implementiert.

Bei der kohärenten Überlagerung der Einzelbeiträge einer Lautsprecheranordnung für die Berechnung des Direktschalls erweisen sich die wenn überhaupt nur Terz- oder Oktavweise vorliegenden Phaseninformationen der Einzelkomponenten als problematisch. Für bestimmte Richtungen kann auch bei größeren Laufzeitunterschieden zwischen den Komponenten vollständige Auslöschung auftreten, obwohl nur bei bestimmten Frequenzlinien ein Phasenversatz um ungradzahlige vielfache von π auftreten. Dadurch ergibt sich eine mit starken Einbrüchen versehene Richtcharakteristik, die beliebige große Fehler gegenüber der wahren, über den Frequenzbereich gemittelten Charakteristik haben kann. Um hier sichere Ergebnisse berechnen zu können, sind sinnvollerweise komplexe Spektren vorzuziehen, über die dann nach der Addition pro Frequenzband gemittelt wird. Hier sind die Lautsprecherhersteller und Organisationen wie die Audio Engineering Society gefragt, entsprechende Standards festzulegen.

Da im allgemeinen nicht davon ausgegangen werden kann, daß alle Komponenten des Lautsprechers an jedem Punkt hörbar sind, wird für jede Komponente einzeln getestet, ob sie zum Schallfeld bei der gerade untersuchten Hörerposition beiträgt. Beugungseffekte werden hier zur Zeit nicht berücksichtigt.



Für reflektierte Beiträge wird auf die Berücksichtigung der Phase verzichtet, weil im allgemeinen nicht davon ausgegangen werden kann, daß bei der Reflexion der Phasenbezug erhalten bleibt. Vielmehr werden die Beiträge der Komponenten energetisch addiert.

Validierung

Zur Validierung raumakustischer Simulationsverfahren stehen dank der an der PTB durchgeführten Ringvergleiche zwei gut dokumentierte Räume zur Verfügung, für die sowohl geometrische Modelle und die akustischen Randbedingungen

als auch entsprechenden Messwerte vorhanden sind [4][5]. Für den ersten Ringvergleich wurde der Hörsaal der PTB mit etwas über 1500 m³ verwendet. Hier wurde allerdings nur die 1kHz Oktave betrachtet. Der zweite Ringvergleich untersuchte einen Mehrzwecksaal mit ca. 11000 m³ in Jönköping, Schweden. Diese Räume bieten sich für die Validierung der neu implementierten Rechenverfahren an. Verglichen werden die mit den neuen Simulationsalgorithmen berechneten raumakustischen Parameter und die Messungen sowie die früheren Ergebnisse, die aufgrund der gleichen Algorithmen prinzipiell identisch sein müssen.

Vollständig übereinstimmende Ergebnisse sind, wie auch die Veröffentlichungen der PTB zeigen, nicht zu erwarten. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messungen erfolgt daher unter Beachtung der subjektiven Unterschiedsschwellen. Weiterhin ist die PTB bestrebt, auch die Auralisation in die Bewertung mit aufzunehmen. In Hörtests sollen dann die simulierten Impulsantworten mit Kunstkopfmessungen verglichen werden. Der gerade gestartete dritte Ringvergleich bietet schließlich weitere Möglichkeiten zur Validierung. Dieser Ringvergleich verwendet zunächst einen Raum mit sehr einfacher Geometrie, und vorgegebenen akustischen Daten für die Wände. Als Grundlage dient das Musik Studio der PTB. Dadurch sollen die prinzipiellen Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Simulationsprogramme untersucht werden. Prinzipiell wäre zu erwarten, daß alle Programme bei einem Raum mit nur sieben Wänden die gleichen Ergebnisse liefern. In weiteren Schritten werden dann mehr Details wie Fenster und Türen und die an der Decke und an einer Seitenwand vorhandenen Streukörper den Modellen hinzugefügt.

Man darf jetzt schon sehr gespannt sein auf die Ergebnisse des dritten Ringvergleichs, an dem natürlich auch die aus der Kooperation von ITA und ADA hervorgegangene neue Version von EASE mit dem raumakustischen Rechenkern vom ITA teilnehmen wird.

- [1] Torres R. und Kleiner M., Considerations for Including Surface Scattering in Auralization, Collected Papers, joint meeting of ASA, EAA and DEGA, Berlin 1999
- [2] Schroeder, M. R., Kuttruff, K.H., 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.
- [3] Dalenbäck, B.-I., CATT-Acoustics DLL Directivity Interface (DDI), presented at 108 th AES Convention in Paris 2000, <http://www.catt.se/>
- [4] Vorländer, M., International Round Robin on Room Acoustical Computer Simulations. Proc. 15th International Congress on Acoustics, Trondheim 1995, p. 689-692.
- [5] Bork, I., A Comparison of Room Simulation Software - The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation, Acustica united with acta acustica 86 (2000) No.6, S. 943-956