

U. Stephenson, H. Winkler*

Nachhallzeit-Regulierung von Auditorien durch Neigung der Seitenwände

Einleitung

Die Nachhallzeit ist das wichtigste raumakustische Kriterium für Eignung und Qualität eines Konzert- oder Vortragssaales. Je nach Nutzung (Sprache/Musik, Musikgattung und Musikstil) sind recht unterschiedliche Nachhallzeiten ideal, was besonders bei der raumakustischen Optimierung von Mehrzwecksälen Schwierigkeiten bereitet. Zudem verkörpert das Publikum meist den größten Anteil an der Absorptionsfläche, weswegen die Nachhallzeit auch noch stark von der Besucherzahl einer Veranstaltung abhängt. Bei der bekannten Sabine'schen Formel ist die Nachhallzeit nur vom Volumen und der äquivalenten Absorptionsfläche eines Raumes abhängig. Daß dies aber nur bei Einhaltung spezieller Randbedingungen gilt, wird gerne übersehen. So hängen die Nachhallzeiten auch von der Raumform ab, besonders bei ungleichmäßiger Absorptionsflächenverteilung, wie es gerade der Fall ist, wenn die Säle mit Publikum gefüllt sind.

Zwei Auditorien waren hierfür ein gutes Beispiel: Das Neue Gewandhaus in Leipzig und das Kongreßzentrum in Budapest [1,2]. Hier wurden im hinteren Saalbereich an den Seitenwänden Reflektoren mit zur Decke geneigten Oberflächen angebracht. Der Schall wird dadurch so gelenkt, daß er selten den hochabsorbierenden Boden beziehungsweise das Publikum trifft (Bild 1), seltener jedenfalls als es seinem Flächenanteil entspricht. Dadurch erhöht sich, wie gewünscht, die Nachhallzeit. Um herauszufinden, inwieweit bei typischen Grundrißformen durch Neigung von Seitenwandflächen eine Nachhallzeitregulierung überhaupt möglich ist, wurden raumakustische Modellmessungen mit Impulsschalltests im Ultraschallbereich durchgeführt. Diese Technik hat sich seit langem bei der Optimierung zahlreicher Auditorien bewährt.

Geometrie und Absorption der Modellräume

Ausgewählt wurden die Grundrißformen Quadrat, Rechteck, Trapez ('Fächerraum') und ein reguläres Sechseck, nachgebildet im Maßstab 1:20. Die Seitenwände wurden um Kippwinkel von -15 bis 15 Grad geneigt (negativ: nach unten zum Publikum, positiv: zur Decke vom Publikum weg), und zwar um eine

Achse auf mittlerer Höhe, so daß das Raumvolumen konstant blieb (Bild 2). Vorder- und Rückwand blieben zueinander parallel und senkrecht auf dem Boden. Der hochabsorbierende Boden (Absorptionsgrad $\alpha = 0.95$) wurde durch Offenlassen des Modellraums nach oben hin simuliert; die Seitenwände waren weitgehend reflektierend ($\alpha = 0.05$).

Meßergebnisse

Aus den digitalisierten Impulsantworten, ausgewertet im Oktavband um 20 kHz (1 kHz im Original) und gemittelt über alle Plätze, wurden die Anfangsnachhallzeiten bestimmt [4]. Bei allen Raumformen zeigten sich erhebliche Abhängigkeiten vom

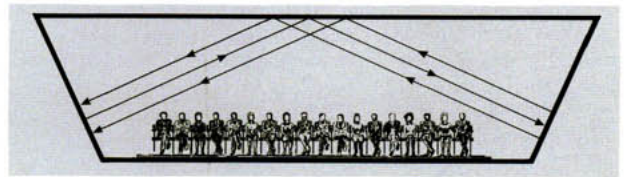


Bild 1: Schematische Darstellung von lang nachhallenden Schallstrahlen an Hand des Raumquerschnittes. Die Strahlen werden durch geneigte Seitenwände so gelenkt, daß sie vom Publikum nicht absorbiert werden.

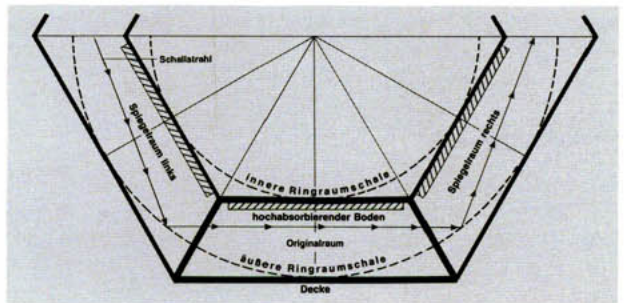


Bild 2: Trapezraum mit seitlichen Spiegelräumen. Die Spiegelräume bilden einen Polygon-Ring, in dem ein Schallstrahl umläuft. Der Originalraum ist fett gezeichnet. Der Polygon-Ring wird durch eine äußere und innere Schale angenähert.

*Institut für Heizung, Lüftung und Grundlagen der Bautechnik der Bauakademie, Berlin, Abteilung Bau- und Raumakustik

Kippwinkel der Seitenwände, und zwar bereits in voller Stärke in einem schmalen, mittleren Winkelbereich von -5 bis 0 Grad (vgl. Bild 3). Nur bei positiven Winkeln zeigte sich ein unterschiedliches Verhalten: Während beim Rechteck- und Quadratraum sowie auch beim Sechseck mit angrenzenden geneigten Seitenwänden die Nachhallzeiten ansteigen, sinken sie bei den Trapezräumen und beim Sechseckraum mit gegenüberliegenden geneigten Wänden wieder ab.

Erklärung und Berechnung des Effektes

Zweierlei Rechnungen wurden durchgeführt:

1. Zur Erklärung: eine analytische Rechnung mit den Methoden der statistischen Raumakustik für einen Ringraum (Näherungsannahme: kleine Neigungswinkel der Seitenwände);
2. zur Prognose und Kontrolle der 1. Rechnung: eine Schallteilchen-Simulation [3] im exakten Raumquerschnitt (Trapezraum).

Die Sabine'sche Theorie geht unter anderem von der Annahme diffuser Wandreflexionen aus. Danach würde die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Raumfläche von Schallteilchen getroffen wird, unabhängig von der Vorgeschichte des Teilchens sein. In Wirklichkeit aber sind die Wandreflexionen eher geometrisch, die Pfade jedes Teilchens über mehrere Reflexionen von Anfang an vorherbestimmt. Mit jeder Reflexion ist auch eine Teilabsorption verbunden. Gerade dies eröffnet die Chance, für jeden dieser Pfade eine charakteristische exponentielle Weg-Energie-Funktion und damit eine Einzel-Nachhallzeit zu berechnen und diese dann am Ende zu mitteln. Dabei betrachtet man am besten bestimmte Klassen von Reflexionen, hier etwa die an Boden, Decke und Seitenwänden, und berechnet für diese die Reflexionshäufigkeiten in Abhängigkeit des Abstrahlwinkels von der Schallquelle. Sind die Neigungswinkel klein, kann man den (sich im Querschnitt ergebenden) Trapezraum näherungsweise durch einen Ringausschnitt-Raum ersetzen (Bild 2). Dadurch wird die Rechnung entscheidend vereinfacht. Die Ringausschnitte kann man dann durch Spiegelung an ihren eigenen Seitenwänden zu einem geschlossenen Ringraum ergänzen. An den Seitenwänden sonst reflektierte Strahlen laufen in Spiegelräumen geradeaus weiter; nur noch an den 'Böden' und 'Decken', die hier die innere und äußere Kreisschale des Ringraums bilden, werden sie reflektiert. Ein zwischen diesen beiden Ringschalen pendelnder Strahl wird unter immer gleichen leicht berechenbaren Winkeln reflektiert. Man sieht leicht, daß - bei positiven Neigungswinkeln, also mit den gespiegelten Raumböden auf dem Innenring - es einen Grenzwinkel für die Laufrichtung eines Strahles gibt, bei dem er nie den hochabsorbierenden Raumboden erreicht; das ist genau die in Bild 1 gezeigte Situation, die entscheidend zur Nachhallverlängerung beiträgt. Unter Berücksichtigung einiger statistischer Besonderheiten [4] ergibt sich die Gesamtnachhallzeit des Raumes schließlich durch numerische Integration über alle exponentiellen Energieabfälle und durch Auswertung an der Stelle der nach Sabine zu erwartenden Zeit für den 15dB-Abfall.

Rechenergebnisse

Bild 3 zeigt gemessene, analytisch berechnete und per Schallteilchensimulation berechnete Nachhallzeit-Verlängerungsfaktoren gegenüber Sabine als Funktion des Seitenwandneigungswinkels.

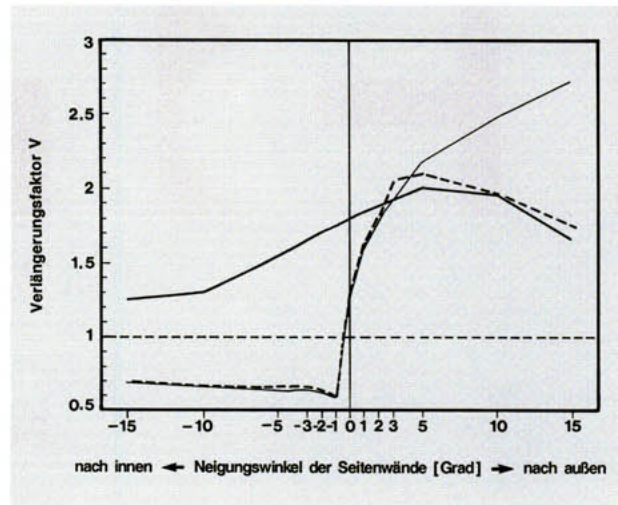


Bild 3: Nachhallzeitverlängerungsfaktoren V gegenüber Sabine'schen Werten als Funktion des Seitenwandneigungswinkels

- = gemessen im Modell
- - - = analytisch berechnet für den Ringraum
- = per Schallteilchensimulation im Trapezraum

Bei positiven Winkeln ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Teilchensimulation und Messung. Die analytische Lösung ist zwar, wie zu erwarten, nur für kleine Neigungswinkel gut. Mit diesen wird aber bereits die ganze Spannweite der Nachhallzeit-Änderung erfaßt; ein stärkeres Kippen der Seitenwände würde sich in der Praxis ohnehin nicht lohnen. Die Diskrepanz zwischen Messung und Rechnung bei negativen Kippwinkeln erklärt sich daraus, daß dann die Nachhallvorgänge in der Längsrichtung des Raumes, die in dieser 2-dimensionalen Rechnung vorerst nicht berücksichtigt wurden, dominieren. Als Konsequenz ergibt sich: Bei Neigung ganzer Seitenwände um nur ± 3 Grad kann in vollbesetzten Auditorien die Nachhallzeit drastisch, nämlich um Faktoren bis zu 2 variiert werden. (Dies gilt hier bei einem Breite/Höhe-Verhältnis von nur 1.65, bei größeren Quotienten sind die benötigten Kippwinkel kleiner.) Dieser unter Umständen höchst erwünschte Effekt kann in Abhängigkeit von Raumgeometrie und Absorberverteilung durch eine Schallteilchensimulation gut prognostiziert werden.

Literatur

- [1] Fasold, W., Küstner, E., Trennhardt, H.-P., Winkler, H.: Akustische Maßnahmen im Neuen Gewandhaus Leipzig, in: Bauforschung-Baupraxis, H. 117 (1982), S. 9-37.
- [2] Fasold, W., Marx, B., Trennhardt, H.-P., Winkler, H.: Raumakustische Maßnahmen im Kongreßzentrum Budapest, in: Bauforschung-Baupraxis, H. 229 (1988), S. 5-17.
- [3] Stephenson, U.: Eine Schallteilchen-Computersimulation zur Berechnung der für die Hörsamkeit in Konzertsälen maßgebenden Parameter, in: ACUSTICA 59 (1985), S. 1-20.
- [4] Winkler, H., Stephenson, U.: Einfluß geneigter Seitenwände auf die Nachhallzeit. Fortschritte der Akustik, DAGA 1990, Wien, DPG-GmbH, Bad Honnef, (1990), S. 867-874.



FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK
 Leiter: o.Prof. Dr. Dr. h.c. Karl Gertis
 7000 Stuttgart 80, Nobelstraße 12, Tel.(0711)970-00
 8150 Holzkirchen (OBB), Postf. 1180, Tel. (08024)643-0

Herstellung und Druck:
 SDSC, Informationszentrum RAUM und BAU
 der Fraunhofer-Gesellschaft, Stuttgart
 Nachdruck nur mit schriftlicher Genehmigung des
 Fraunhofer-Instituts für Bauphysik