

Einbau von Beugung in raumakustische Strahlverfolgungsprogramme – lohnt sich das, und geht das ohne Rechenzeitexplosion ?

Uwe M. Stephenson

Hochschule für angewandte Wissenschaften, Hamburg; email: U.M.Stephenson@t-online.de

Einführung

Hauptdefizit der strahlengeometrisch-energetischen Simulationsmethoden in der Raumakustik ist bis heute die mangelnde Berücksichtigung von Welleneffekten wie Beugung. Drei Grundalgorithmen werden verwendet: die Spiegelquellenmethode [1] (nur für niedrige Reflexionsordnungen), Schallteilchen [2] - oder Strahlverfolgungsmethoden, - heute zur Vermeidung statistischer Fehler oft mit der Spiegelmethode kombiniert - und in jüngster Zeit die Radiosity- (Strahlungsaustausch-) Methode, numerisch, die zeititerative Ausführung von Kuttruffs Integralgleichung [3]), eine einfache und sehr effiziente Methode, die jedoch diffuse Reflexionen voraussetzt, und in der Raumakustiksimulation als Ergänzung meist für den Nachhallschwanz verwendet wird [4]. Die Strahlen können dünn sein - *rays* - (und die Detektoren ausgedehnt) oder umgekehrt, die Strahlen ausgedehnt - *beams* - , entweder Kegel- oder Pyramidenstrahlen (durch Anpeilen der Oberflächenpolygone). Werden Pyramidenstrahlen rekursiv abgespalten, ist diese Methode äquivalent mit einer effektiven Spiegelmethode, erst in jüngster Zeit auch in der Raumakustik angewandt [5]. Diese Methode ist noch am ehesten geeignet, rekursiv mit Streuung kombiniert zu werden. Beim Einsatz kohärenter Strahlen bietet sich dazu die Geometrische Theorie der Beugung an. Kürzlich gelang sogar eine Auralisation [6]. Allen Methoden ist die Vernachlässigung der Beugung gemeinsam. Klar war aber schon lange: Jeder Einbau von Streuung lässt, da naturgemäß rekursiv anzuwenden, die Strahlenanzahl und damit die Rechenzeit explodieren.

Lohnt sich der Einbau von Beugung, wäre dies hörbar ?

Natürlich sind die Hauptanwendung einer Erweiterung um Beugung die Freifeldanwendung /Lärmimmissionsprognose, allgemein Fälle, wo Schall nur durch Beugung, nicht maskiert durch Reflexionen, zum Empfänger gelangt. In geschlossenen Räumen wird also der Nutzen geringer sein. Ein typischer Fall ist der der Schallabschattung eines Orchestergrabens. Es kann aber abgeschätzt werden, dass der Effekt der Beugung energetisch, etwa beim Deutlichkeitsmaß, kaum nachweisbar wäre. Aus zahlreichen Untersuchungen (z.B. 8,9) ist jedoch bekannt, dass die Qualität der Auralisation unter der mangelnden Berücksichtigung von Beugungseffekten leidet. Die vereinfachende Annahme diffuser Reflexion, etwa bei Treppenstrukturen, ist nicht immer ausreichend. Unter Umständen - z.B. bei den antiken Amphitheatern [10] - wird dadurch sogar die Nachhallzeit beeinflusst.

Ziel ist deshalb das Schließen der „Wellenlängenlücke“ zu FEM/BEM-Methoden für Räume, die zwar groß, aber nicht mehr sehr groß gegen die Wellenlänge sind. Gesucht ist ein einheitlicher, universeller Algorithmus, der die beliebige Kombination von Reflexionen und Beugungen höherer Ordnung ohne Rechenzeitexplosion ermöglicht.

Problem und Lösung des Einbaus von Beugung

Gerade bei Mehrfachbeugungen an Gebäudekanten nach dem Umwegmodell [7] ergeben sich aber zahlreiche Wider-

sprüche. Außerdem würde bei rekursiver Suche nach allen Kombinationen die Rechenzeit noch weiter exponentiell steigen. Geometrische Theorien der Beugung sind zwar auch bekannt, können jedoch nicht mit einem Strahlenmodell kombiniert werden, weil sie exaktes Treffen von Kanten voraussetzen. Offensichtlich sollten von effizienten Algorithmen nur strahlennahe Kanten gefunden werden, mit denen jene „wechselwirken“. Hierfür wurde schon vor langer Zeit [11] ein Schallteilchen-Beugungs Modell entwickelt.

A) AWWD für ein einzelnes Schallteilchen, abhängig vom Vorbeiflugabstand a ;

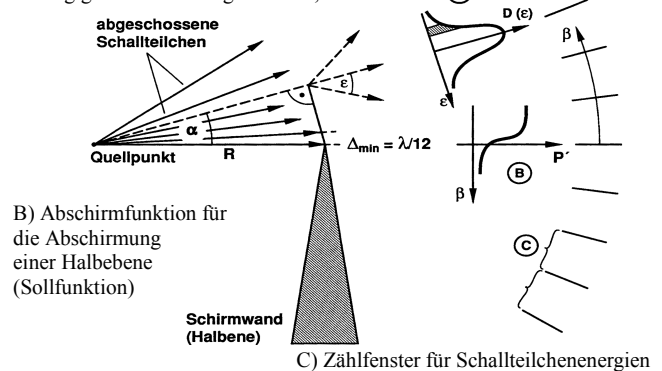


Abbildung 1. Zur Schallteilchen-Beugungsmodell

Strahlen spalten sich danach in der Nähe einer Kante auf, werden entsprechend einer Ablenkungswahrscheinlichkeitsdichtefunktion (AWWD) gebeugt; gleichzeitige Beugung an mehreren Kanten, neben- oder nacheinander, soll aus jener baukastenartig zusammengesetzt werden, ihre „Kantenbeugungswirkungen“ (KBW) sich dabei addieren: Es bleibt bei energetischer Addition. Idee dieses heuristischen Modells war, inspiriert von der Unschärferelation: Desto kleiner der Vorbeiflugabstand a , desto schmaler ein imaginärer „Spalt“ (Breite = $1/\text{Summe der KBW}$) und desto breiter die AWWD. Diese Verteilung konnte aus der Spaltbeugungsfunktion abgeleitet werden. Mit diesem frühen, einfachen Modell ergaben sich im numerischen Experiment gute Übereinstimmungen mit den bekannten Winkelfunktionen des Transmissionsgrades am Schirm und gleichzeitig auch am Spalt. Später gelang es, die AWWD analytisch aus der Fresnel-Kirchhoff'schen Theorie herzuleiten [12]. Auch dieses Modell brachte sehr gute Übereinstimmung mit der Winkelfunktion des Schirms, versagt aber (wegen der Interferenzterme) bei mehreren Kanten, ist also nicht modularisierbar. Heute wird deshalb dem alten Modell der Vorzug gegeben [15]. Das Problem der Rechenzeit-Explosion bei rekursiver Anwendung ist jedoch damit noch nicht gelöst.

Warum Pyramiden-Strahlen?

Inspiriert vom Radiosity-Verfahren (Umverteilung von Energien unter nur endlich vielen Wänden als „Umverteilungen“) wurde erkannt [13]: die prinzipielle Lösung des Problems der rekursiven Aufspaltung und Rechenzeitexplosion liegt in der Wiedervereinigung von Energieträgern, die räumlich und zeitlich konvergieren. Die Wahrscheinlichkeit

dazu ist bei (punktförmigen) Teilchen aber Null. Wie oben angedeutet, bieten deshalb ausgedehnte Strahlen wie Pyramidenstrahlen („Pyre“) die besten Chancen. Pyr tracing ist wesentlich komplizierter als ray tracing. Das Problem des Clippings (Finden von Schnitt-Polygonen aus Pyren und Oberflächenpolygonen) kann aber gelöst werden [14,16].

Warum Quantisierung ?

Wie bei radiosity bedarf es einer Quantisierung der Raumbofläche, wie beim ray tracing jedoch auch einer Quantisierung der Raumwinkel. Dies ist die **Methode des Quantized Pyramidal Beam Tracing (QPBT)**. Quantisiert wird dabei der Spiegelquellenraum:

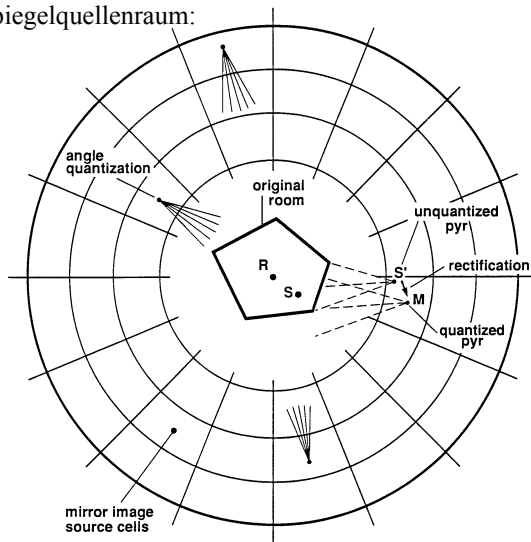


Abbildung 2:

Quantisierter Spiegelschallquellenraum (SSQR): In der Mitte der Originalraum mit einem Quellpunkt S und einem Empfangspunkt R; um jenen herum, ab einem gewissen Mindestradius r_0 , konzentrische Ringe (Kugelschalen) unterteilt in Zellen konstanten Raumwinkels

Nach Spiegelung in eine Zelle des SSQR fallende Pyre bzw. Spiegelquellen (rechts S') werden jeweils in deren Mitte M „zurechtgerückt“. Von dort werden wieder die Polygone des Raum angepeilt. Genau dadurch sind auch die Raumwinkel der Pyre vordefiniert, quantisiert [16] (was früher ein Problem war [13]). Durch Einsortieren der gespiegelten – oder gestreuten – Pyre in eine (durch die Polygone vorgegebene) endliche Anzahl quantisierter Pyre wird der Wiedervereinigungseffekt bewirkt. Dabei werden die Energien je nach Überlappungsgrad der Raumwinkel der Pyre weitervererbt. Das Ganze konvergiert gegen eine Nur-Noch-Umverteilung unter endlich vielen „Umverteilungstationen“. Auch für das Problem der Ausführungsreihenfolge bzw. der „Logistik“ wurde eine Lösung gefunden [16].

Einbau von Beugung

Ein Problem ist schon die Erfassung „naher“ beugender Kanten. Dieses wird elegant gelöst durch eine Zerlegung des Raumes in konvexe Zellen. Dies ist auch für die Rechenzeitminimierung gut, denn es führt zu einer erheblichen Vereinfachung des Pyr-Clippings (da Polygonquerschnitte der Pyre zusammenhängend bleiben) [16]. Die Raumboflächen, insbesondere die die Zellen trennenden „transparenten Zwischenwände“ werden in kleine Patches zerlegt, auf den kantennahen Randzonen in etwas kleinere, die „beugungswirksam“ sind, d.h. ein Auftreffen von Pyren führt zur deren Beugung und Aufspaltung nach obigem Modell. Koeffizienten hierfür müssen noch gefunden werden.

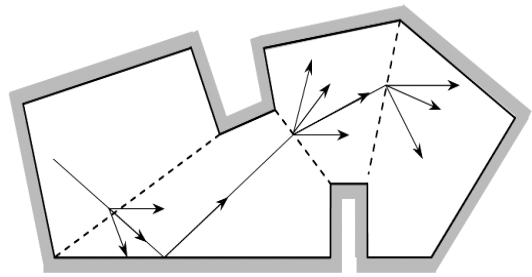


Abbildung 3: Konvexerlegter Raum mit gebeugten Strahlen an transparenten Zwischenwänden:

Ergebnis und Ausblick

Einbau von Beugung ohne Rechenzeitexplosion ist machbar. Durch QPBT ist die Simulation sowohl geometrischer und diffuse Reflexionen wie auch Beugungen in beliebiger Kombination ohne Rechenzeitexplosion möglich.

Die Rechenzeiten dürften für typische Anwendungen auf heutigen PC bei einigen Minuten bis Stunden liegen – wenn auch bei sehr hohem Arbeitsspeicherbedarf. Die vorgeschlagenen Algorithmen sind jedoch noch zu implementieren.

Damit wird die Qualität der Auralisation verbessert werden können. Die Hauptanwendung dürfte jedoch bei der Lärmimmissionsprognose im Freien liegen.

Literatur

- [1] Borish, J.: Extension of the image model to arbitrary polyhedra. J.Ac.Soc.Am. 75 (1984), p.1827-1836
- [2] Stephenson, U.: Eine Schallteilchen-Computer-Simulation zur Berechnung der für die Hörsamkeit in Konzertsälen maßgebenden Parameter. ACUSTICA 59(1985), 1-20.
- [3] Kuttruff, H.; Energetic sound propagation in rooms; Acustica / acta acustica vol 83 (1997), S. 622-628
- [4] Lewers, T.: A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics; Appl. Acoustics 38 (1993), 2-4, p. 161- 178
- [5] Funkhouser, T.; Carlbom, I.; Elko, G.; Pingali, G.; Sondhi, M.; West, J.: A beam tracing approach to acoustic modeling for interactive virtual environments; in: proc. of Computer Graphics, SIGGRAPH '98 Annual Conference Series, 1998, p.21-32
- [6] Tsingos, N.; Funkhouser, T.; Ngan, A.; Carlbom, I.; "Modeling acoustics in virtual environments using the uniform theory of diffraction"; Proc. of ACM Computer Graphics, Siggraph 2001
- [7] Maekawa, Z.; Noise reduction by screens, Appl.Ac. 1 (1968)
- [8] Dalenbäck, B.I.; Kleiner, M.; Svensson, P.; Audibility of changes in geometric shape, source directivity and absorptive treatment- experiments in auralization, J. Audio Engineering Soc. 41(11) (1993), 905-913
- [9] Mommertz, E.; Untersuchung akustischer Wandeigenschaften und Modellierung der Schallrückwürfe in der binauralen Raumsimulation; Diss. RWTH Aachen, Fak. Elektrotechnik; 1995; Shaker, Aachen, 1996
- [10] Lisa, M.; Rindel, J.H.; Christensen, C.L.; Predicting the acoustics of ancient open-air theatres: the importance of calculation methods and geometrical details; Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting, 2004, Mariehamn, Åland
- [11] Stephenson, U., Mechel, F.P.: Wie werden Schallteilchen gebeugt ? In: Fortschritte der Akustik, DAGA 1986, Oldenburg
- [12] Stephenson, U.M.; Ein neuer Ansatz zur Schallteilchen-Beugung; In: Fortschritte der Akustik, DAGA 1993, Dresden
- [13] Stephenson, U.; Quantized Pyramidal Beam Tracing - a new algorithm for room acoustics and noise immission prognosis; ACUSTICA united with acta acustica, vol. 82 (1996), 517-525
- [14] Stephenson, U.M.; Quantisierte Pyramidenstrahlen oder Schallteilchen-Radiosity-Methode ? Lösung der Probleme der Quantisierung und der Quasi-Simultanverfolgung, DAGA 2003, Aachen
- [15] Stephenson, U.M.; Schallteilchen - Beugung – möglich und sinnvoll ? - Vergleich und Diskussion des „Stuttgarter“ und des „Trondheim“ Modells, DAGA 2003, Aachen
- [16] Stephenson, U.M: Beugungssimulation ohne Rechenzeitexplosion: Die Methode der quantisierten Pyramidenstrahlen – ein neues Berechnungsverfahren für Raumakustik und Lärmimmissionsprognose, Vergleiche, Ansätze, Lösungen; Diss. RWTH Aachen, Fak. Elektrotechnik; Shaker, Aachen, 2004