

Quantisierte Pyramidenstrahlen oder Schallteilchen-Radiosity-Methode ? Lösung der Probleme der Quantisierung und der Quasi-Simultanverfolgung

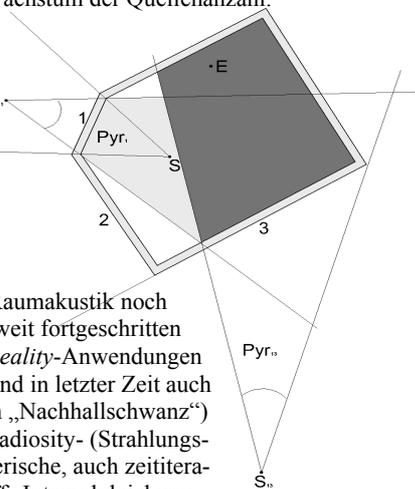
Uwe M. Stephenson

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

State of the Art numerischer Methoden der Raumakustik

In der Raumakustik wie bei der Lärmimmissionsprognose werden im Wesentlichen (geordnet nach steigender Reflexionsordnung) zwei Grundalgorithmen verwendet: die Spiegelquellenmethode, „exakt“ (im optischen Grenzfall kurzer Wellenlängen), jedoch nur für geometrische Reflexionen und die statistische, aber effizientere [1] Schallteilchen- oder Strahlverfolgungsmethode, die auch diffus reflektierende Wände simulieren kann; jene kann man in Ray- und, falls die Strahlen räumlich ausgedehnt sind, in Beam-Tracing-Methoden zerteilen, letztere wiederum in Kegelstrahlen- und, exakter, in die allerdings wegen ihrer geometrischen Komplexität noch seltener angewandten Pyramidenstrahlen-Methoden [6]. Pyramidenstrahlen („Pyre“) sind Spiegelquellen mit eingebauter Sichtbarkeitsgrenzen. Konsequenter, d.h. rekursiv angewandt, ist die Pyr-Methode deshalb nichts weiter als eine effektive Spiegelquellenmethode ohne exponentielles Wachstum der Quellenanzahl.

Abbildung 1 zum Pyr-Tracing: Beispiel dafür, dass ein Empfangspunkt (E) eine „Mutter“- Spiegelquelle (S1) nicht „sieht“ (liegt nicht in Pyr-1), jedoch liegt E in Pyr 13 von S13 unten; nur von einem E aus unsichtbare Pyr müssen deshalb konstruiert werden.



Rekursiv wurde sie auf die Raumakustik noch nicht angewandt, immerhin weit fortgeschritten bereits für auditive *Virtual Reality*-Anwendungen [5]. Aus der Optik bekannt und in letzter Zeit auch für die Raumakustik (für den „Nachhallschwanz“) angewandt [4] ist auch die Radiosity- (Strahlungsaustausch-) Methode. =numerische, auch zeititerative Ausführung von Kuttruffs Integralgleichung [2]), die allerdings „vergessende“ und damit diffuse Reflexionen voraussetzt.

Hybridmethoden verwenden Ray-Tracing zur Findung von Spiegelquellen, neuerdings auch mit Zwischenspeicherung diffuser Anteile [3,4], Übergang zu Radiosity [4] oder sogar einem Wiedervereinigungseffekt [3]. Allen aber ist die Vernachlässigung der Beugung gemeinsam. Ziel ist es deshalb seit langem, geometrische Methoden mittels Einbau von Beugung für längere Wellenlängen bzw. für Räume zwar groß, aber nicht mehr sehr groß gegen die Wellenlänge tauglich zu machen, dabei mindestens das Umwegesetz [8] zu erfüllen, einen einheitlichen und effizienten Universalalgorithmus für Raumakustik und Lärmimmissionsprognose zu entwickeln, um sowohl Prognosegenauigkeit als auch Qualität der Auralisation zu verbessern ohne die sonst nach Einbau von Teilchenstreuung zu erwartende Explosion von Teilchenzahl und Rechenzeit.

Frühere Lösungsideen

Schon früher wurde erkannt, dass eine prinzipielle Lösung dieses Problems bzw. des Problems der rekursiven Zersplitterung in der Wiedervereinigung von Energieträgern liegt, so, wie sie offenbar beim Radiosity-Verfahren auf Oberflächenstücken passiert. Strahlen sollten, je nach Überlappung ihrer Raumwinkel wiedervereinigt, bzw. ihre Energien „vererbt“ werden. Die Koinzidenzwahrscheinlichkeit von (punktförmigen) Teilchen ist aber gering. Das führte zum Pyr-Modell. Allerdings ist nach Einbau von Streuung wieder mit einer Rechenzeitexplosion zu rechnen. Die Idee von Radiosity, der Umverteilung unter endlich vielen „Umverteilstationen“ (Wänden) sollte auch aufgegriffen werden. Das führte zur Erkenntnis, dass nicht nur der Raumwinkel (wie bei Schallteilchen

zu Anfang) sondern auch die Raumboberfläche zu quantisieren sei, oder, angesichts der Erkenntnis, dass mit zunehmender Reflexionsordnung die Herkunft der Strahlen, m.a.W. der Ort der Spiegelquellen nur noch ungefähr interessiert, der Spiegelquellenraum. Dies war die Hauptidee der vom Autor entwickelte Methode der „quantisierten Pyramidenstrahlen“ (*QPBT*) [6] - eine Kombination von Spiegelquellenmethode mit Radiosity (s. Abb.2).

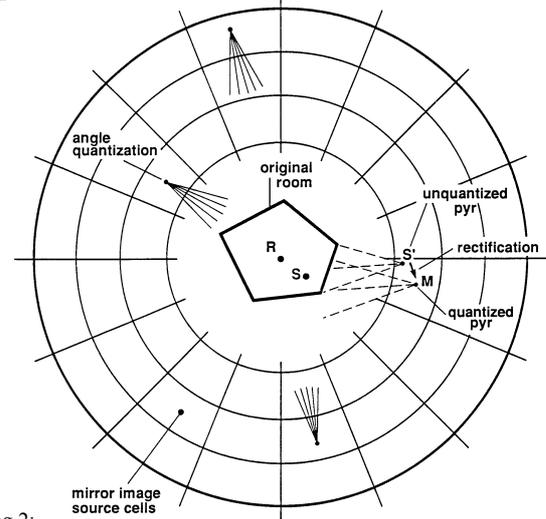


Abbildung 2:

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 Polar- und Azimutalwinkels, die „älteren“ Pyre bzw. SSQ liegen weiter innen, die höherer Ordnung weiter außen.

Nach Spiegelung in eine Zelle des SSQR fallende Pyre bzw. Spiegelquellen (rechts S') werden jeweils in deren Mitte M „zurechtgerückt“ und dort mit ggf. schon anderen dorthin gespiegelten Energien vereinigt. Die Pyr-Orientierung (durch die gestichelte Linien angedeutete Raumwinkelbereiche) bleibt bei dieser Parallelverschiebung erhalten. Der Raumwinkel für die Re-Emission in Richtung Originalraum ist auf „normierte“ Weise, in Teilraumwinkel zu unterteilen, zu „quantisieren“ (s. Büschel in Abb.2). Den dadurch bewirkten Wiedervereinigungseffekt zeigt symbolisch Abb.3.

quantization with respect to source position and radiation angles

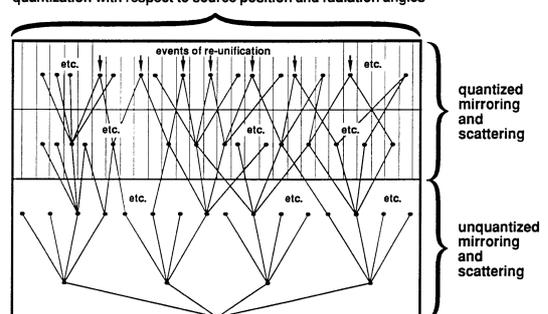
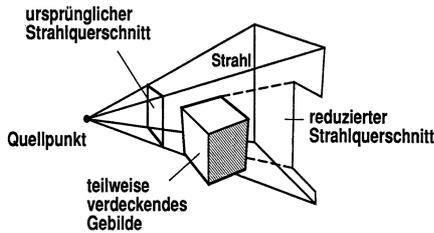


Abbildung 3: Baumstruktur der Verfolgung von Pyramidenstrahlen (symbolisch, nach rechts aufgetragen SSQR-Zellen- und Re-Emissions-Raumwinkel-Nummer). unten: Baum des Pyr-Tracing mit zwar abnehmendem Verzweigungsgrad durch Reflexionen, jedoch gleich bleibend durch Streuung; oben mit Quantisierung: Vermeidung der exponentiellen Zunahme der Anzahl Äste durch Einsortierung in vordefinierte, gequantelte Pyr

Während fortlaufender quasi-gleichzeitig auszuführender, sich gegenseitig radial „überholender“ Spiegelungen bildet sich so im SSQR (Abb.2.) eine nach außen driftende „Wolke“ besetzter Zel-

len, und das Ganze konvergiert gegen eine Nur-Noch-Umverteilung unter endlich vielen „Umverteilstationen“ (=Spalten in Abb.3.)

Abbildung 4. **Clipping von Pyramidenstrahlen:** Einschränkung des Strahlquerschnitts eines Pyr durch einen teilweise verdeckendes Raumobjekt, Weiter-Transmission des Rest-Pyrs, Reflexion des auf das Objekt projizierten Teils (s. Abb.1.)



Ungelöst waren jedoch die komplizierten Probleme eines effektiven Pyr-Clippings (Finden von Schnitt-Polygonen nach Projektion auf den Raumpolyeder, s. Abb.4.), der optimalen Quantisierung der Raumwinkel und der schnellen Findung jeweils benachbarter Pyre, in die Schallenergie „zur vererben“ ist, als auch der schnellen Findung jeweils „ältester „Pyre“; denn es gilt: Der „älteste“ (d.h. am wenigsten weit gelaufene) Pyr muss stets zuerst bearbeitet werden, Energie kann erst dann weitervererbt werden, wenn alle aus früheren Pyren auf einem „Umverteilplatz“ (Oberfläche) angekommen ist (Quasi-simultane Pyr-Verfolgung).

Lösung des Problems der Quantisierung der Raumwinkel

Eine konstante Raumwinkelquantisierung (Büschel in Abb.2.) ist nicht sinnvoll, vielmehr eine Anpassung an die Raumboberflächenstruktur des Polyeders. Die Quantisierung geschieht ganz einfach durch „Anpeilen“ der Wände des Raums selbst, bzw. durch „in jeder Runde“ („Zeile“ von Abb. 7) neu definierte Querschnitte bzw. – Raumwinkel von Pyren.

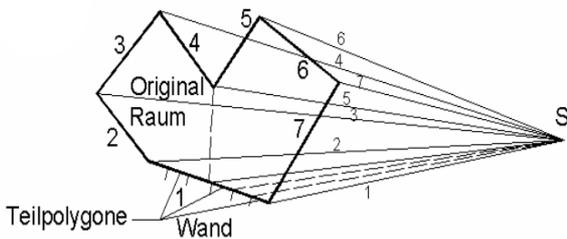
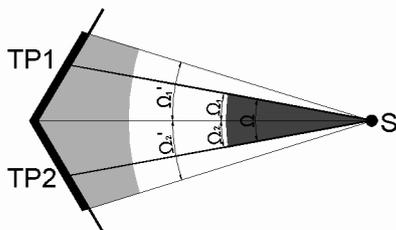


Abbildung 5 : Anpeilen des Originalraums von einer SSQR-Raum-Zellenmitte aus (M, rechts); involviert sind dabei nur diejenigen Polygone (hier links), die M ihre Vorderseite zuwenden.

Zwecks Genauigkeit sind die konvexen Polygone des vorher konvex-zerlegten Raums noch in kleine, etwa gleichgroße Teilpolygone zu zerlegen, wie hier bei Wand 1 unten angedeutet, so dass sich auch entsprechend mehr Pyre ergeben. Benachbarte Pyre finden sich so von selbst. Der entscheidende Unterschied zum unquantisierten Pyr-Tracing: Die Querschnitte der Pyre der nächsten Generation werden nicht durch die **Schnitt**-Polygone alter Pyr- mit Wandpolygone gebildet, „quantisiert“, sondern **allein** durch letztere ; d.h. sie sind zu groß; die von den Pyren übertragene Energie wird so auf einen jeweils größeren Raumwinkel raumwinkelanteilmäßig „verschmiert“, bzw. interpoliert (Abb. 6).

Abb.6 : Von einem auf die Mitte einer SSQR-Zelle zurechtgerückten Quellpunkt S (vergl. Abb.2.) aus wird ein noch unquantisierter Pyr (dunkel) auf zwei Teilpolygone TP1 und TP2 eines Raumes (links) projiziert, wobei jeweils ein Teilraumwinkel sich mit den durch die Teilpolygone vorgegebenen (hell grau) überschneidet.



So fließt ein Teil der Pyr-Energie in den durch TP1 quantisierten, ein anderer in den durch TP2 quantisierten Pyr; in demselben TP1 und demselben TP2 sammelt sich aber auch Energie von auf andere

SSQR-Zellen zurechtgerückten Pyren. So wird der Wiedervereinigungseffekt effizient erzielt (vergl. Abb.3 oben).

Lösung des Problems der Quasi-Simultanverfolgung

Für das o.g. Problem der Ausführungsreihenfolge bzw. der „Schallteilchen-Logistik“ wurde bereits, allerdings für die ungenauere Schallteilchen-Radiosity –Methode [7] eine Lösung gefunden. Es zeigte sich, dass das Prinzip „der älteste Pyr zuerst“ nur ungefähr eingehalten zu werden braucht, und dass der Besetzungsgrad der Matrix (Abb.7) so hoch ist (=mittlere freie Weglänge /Raumdiagonale), dass eine „sture“, zeilenweise Abarbeitung möglich ist. Der Arbeitsspeicher ist zyklisch stets wieder neu nutzbar, da einmal frei werdende Zellen (bei Spiegelung im SSQR: „innere Ringe“) wieder neu besetzt werden können.

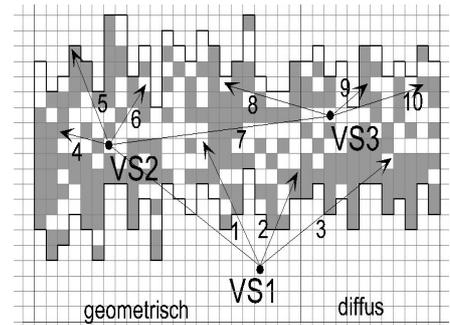


Abbildung 7: Symbolische Energie-Umverteilung bei einer um geometrische Reflexionen erweiterten zeiterativen Radiosity-Methode oder QPBT mit diffusen oder gebeugten Anteilen (symbolisch rechts) VS=virtual sources (Pyre); nach rechts, geordnet und nummeriert, Raumwinkel und Herkunftsort (SSQR-Zelle), nach oben Nr. des Zeitintervalls = Speicher-„Zeilen“-Nummer, grau: durch Pyre besetzte bzw. mit Energie gefüllte Felder; Umverteilungvorgang stets der ältesten Pyre aus der untersten Zeile (Pfeile 1-3) zuerst, später anderer (Pfeile 4-10) in obere; durch z.B. Pfeile 3,7 Übergang geometrisch-diffus, durch 8 diffus-geometrisch

Einbau von Beugung

ist möglich durch Zerlegung des Raumes in konvexe Zellen (auch für die Rechenzeitminimierung gut [5]) sowie das Einrichten von kantennahen Randzonen auf „transparenten Wänden“ zwischen diesen Zellen [8]. Bevorzugt wird der Einbau des „Stuttgarter“ Strahlenbeugungs- (Kanten-Wechselwirkungs-)Modells [9].

Ergebnis: Durch QPBT ist die Simulation sowohl geometrischer und diffuse Reflexionen wie auch Beugungen in beliebiger Kombination ohne Rechenzeitexplosion möglich.

Referenzen

[1] Stephenson, U.M.; Comparison of the Mirror Image Source Method and the Sound Particle Simulation Method. Applied Acoustics 29 (1990), H.1., S.35-72.
 [2] Kuttruff, H.; Energetic Sound Propagation in Rooms; Acta acustica vol 83 (1997), S. 622-628
 [3] Dalenbäck, B.-I.; Room Acoustic Prediction Based on a Unified Treatment of Diffuse and Specular Reflection; in: J.Acoust.Soc.Am., April 1995
 [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.; Carbon, L.; 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] 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
 [7] Stephenson, U.M.; Simulation von Streuung und Beugung ohne Rechenzeitexplosion? Lösung durch Kombination der Schallteilchen- mit der Radiosity-Methode, DAGA 2001, Hamburg
 [8] Stephenson, U.M.; Schallteilchen - Beugung – möglich und sinnvoll? - Vergleich und Diskussion des „Stuttgarter“ und des „Trondheim“ Modells, DAGA 2003, Aachen
 [9] viele Details bereits ausgearbeitet, demnächst zu veröffentlichen