Bestimmung von Beugungsparametern für die Echtzeit-Auralisierung in urbanen Räumen

Jonas Stienen, Michael Vorländer

Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen, Kopernikusstraße 5,52074 Aachen
E-Mail: {jst, mvo}@akustik.rwth-aachen.de

Einleitung

In der Auralisierung von Außensituationen spielt die Beugung von Schall eine entscheidende Rolle. Gerade in bebauten Gebieten, in denen der Direktschall nicht Teil des Transferpfades von einer Quelle zu einem Empfänger ist, ist dieser Effekt häufig entscheidend für das resultierende Schallereignis. Zur Berechnung der Schallbeugung um eine oder mehrere endlich oder unendlich ausgedehnte Objektkanten existieren neben den A-Pegel-Normverfahren Näherungslösungen, die ausschließlich mit Mitteln der geometrischen Akustik berechnet werden und nicht nur Pegel, sondern ein Betragsspektrum oder eine Impulsantwort liefern. Unabhängig von der Berechnung der Beugungsfilter des akustischen Transferpfades wird hier ein Ansatz beschrieben, der die benötigten Eingabeparameter für den Einsatz der interaktiven Echtzeit-Auralisierung bestimmt. Quell- und Empfängerposition, umgebende bewegliche Objekte und die statische Geometrie des urbanen Raums werden verwendet, um deterministisch Parameter in geeignete Datenstrukturen zu überführen, die zur Beugungssimulation benötigt werden.

Mehrfachbeugung

Eine große Herausforderung bei der akustischen Simulation von Reflexion und Beugung mit Mitteln der geometrischen Akustik (GA) stellt die Suche nach relevanten Ausbreitungspfaden dar. Die Schallausbreitung entlang der Wellenfront, die sich zwischen Quelle und Empfänger ausprägt, unterliegt Einschränkungen, wenn diese mit Randbedingungen verknüpft wird [1]. Hierbei bezeichnen die wichtigsten Aspekte einerseits die minimale Wegstrecke zwischen den Interaktionspunkten, wie z.B. Reflexionspunkt auf einer Oberfläche oder Apexpunkt bei einer Beugungskante, und andererseits die Erhaltung von Winkelbeziehungen der einfallenden und ausfallenden Welle. Diese unterliegen dem Huygens-Fresnel-Prinzip und geben damit eine strenge Vorgabe vor, wie ein Ausbreitungspfad verläuft. Ein erster Ansatz zur Berechnung der Beugungspfade beliebiger Ordnung wurde von Tsingos et al. vorgeschlagen, welcher die Randbedingungen in ein Gleichungssystem überführt und mit Hilfe einer Matrixdarstellung durch Invertierung die Lösung bestimmt [2]. Das Resultat kann dann unmittelbar als Eingabeparameter für die akustische Beugungssimulation verwendet werden, für welche in der Literatur einige Verfahren zu finden sind [3–6]. Da die unterschiedlichen Verfahren sich zum Teil gravierend in Qualität, Komplexität und Kombinationsfähigkeit für die Mehrfachbeugung unterscheiden, muss die Auswahl kontextabhängig getroffen werden. Einfach- und Doppelbeugungen können zum Beispiel mit exakten Algorithmen erfolgen, während darüber hinaus gehende Mehrfachbeugungen durch einfache Näherungen umgesetzt werden müssen, welche für die Echtzeit-Auralisierung immerhin eine plausible akustische Repräsentation der Umgebung erzeugt. Der vorgestellte Algorithmus leistet in dieser Hinsicht die benötigte Vorarbeit, um fundierte weitergehende Untersuchungen zu ermöglichen. Der Grund, warum bewusst ein deterministisches Verfahren gegenüber den bekannten Näherungsverfahren mit stochastischer Berechnungsgrundlage [7–10] vorgezogen wird, liegt in der exakten Reproduzierbarkeit der Resultate. Ein diffuser Schallanteil, welcher üblicherweise in Innenräumen vorzufinden ist, jedoch in vielen Freifeldsituationen nicht vorkommt, erschwert zudem die Argumentation für den Einsatz nichtdeterministischer Algorithmen in diesem Kontext. Um eine perzeptiv hochwertige Simulation zu erzeugen, die in jedem Fall die wichtigen Übertragungspfade inklusive dem Beugungsanteil beinhaltet, benötigen diese Verfahren unter Umständen eine hohe örtliche Auflösung bzw. räumliche Unterteilung, die den Vorteil der geringen Berechnungszeit für die hier betrachtete Situation relativiert.

Abbildung 1: Ein Empfänger in einer Bushaltestelle ist umgeben von (beweglichen) Objekten, die den Direktschall und Reflexionen verdecken (Motivation für die Beugungssimulation in urbanen Räumen)

Deterministische Pfadsuche mittels GA

Motivation

Um die Auralisierung in urbanen Umgebungen zu implementieren und wissenschaftlich untersuchen zu können, wird eine deterministische Pfadsuche benötigt, die in der Lage ist, unter a-priori Abbruchbedingungen zuverlässig alle gültigen Lösungen bestimmen zu können. Führt man sich vor Augen, dass gewisse Ausbreitungspfade z.B. über Dächer mit nicht-trivialen Formen einen

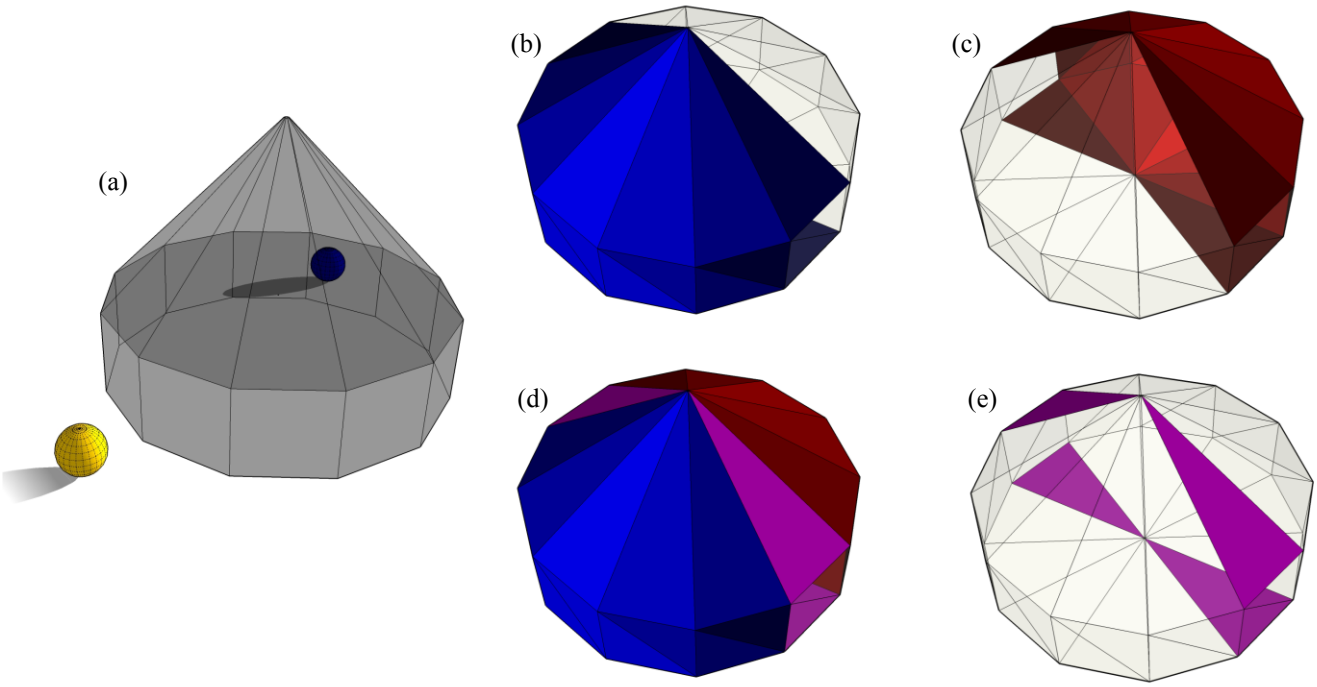

Abbildung 2: Gradientenbildung der Beugungsordnung eines virtuellen Spitzdaches (a) für Quelle (b) in blau und Empfänger (c) in rot; Konturdefinition kombiniert (d) und isoliert (e) in magenta. Quelle (vorne) und Empfänger (hinten) sind direkt vor der vertikalen Wand positioniert, um eine hohe Beugungsordnung zu erzwingen. Abbruchkriterium für die Gradientenbildung: Ordnung 4; Eine kombinierte Beugungsordnung von 8 ist erforderlich, um einen Pfadkandidaten über die Beugungskontur zu ermitteln.

signifikanten Anteil an der gesamten Schallenergie darstellen, jedoch nur durch Beugungen mit hohen Ordnungen darstellbar sind, muss ein Algorithmus entwickelt werden, welcher weit über typische Ordnungszahlen von zwei bis drei Beugungskanten hinaus geht.

Abbruchbedingungen

Der Verlauf von Ausbreitungspfaden mit uneingeschränkter Beugungsordnung resultiert theoretisch betrachtet in unendlich langen Verkettungen, was für einen Algorithmus mittels GA nicht handhabbar ist, wenn die Quell- und Empfängerposition als bekannt vorausgesetzt werden. Erst die Vorwegnahme dieser Metrik erlaubt aber eine effiziente Bestimmung der relevanten Übertragungspfade, die sich ausschließlich auf die gegebene Konstellation bezieht und aus diesem Grund auch als deterministisch betrachtet werden kann. Allgemein werden demnach *a-priori Abbruchkriterien* für die Ermittlung potenzieller Pfade benötigt. Die Einstellung dieser Abbruchkriterien, die neben der Beugungsordnung auch die Pfadlänge und akkumulierte Beugungswinkel beinhalten könnten, wird ausschlaggebend sein für die Qualität und Effizienz der Auralisierung. Eine optimale Einstellung der Kriterien liefert Pfade, die in der Summe den Schallanteil repräsentieren, der energetisch oder perzeptiv betrachtet den größten Einfluss auf das Gesamtsignal darstellen, und im Idealfall Schwellwerte unterschreiten, die z.B. unterhalb der Hörschwelle liegen. Die Überprüfung einer sinnvollen Wahl von Abbruchbedingungen ist erst in Zusammenhang mit der akustischen Simulation möglich, was zum jetzigen Zeitpunkt noch Gegenstand der Untersuchung ist.

Algorithmus zur Pfadsuche

Der vorgestellte deterministische Algorithmus zur Pfadsuche kann logisch in drei Teile aufgespalten werden:

1. Gradientenbildung der Beugungsordnung
2. Problemreduktion durch sukzessive Rotation
3. Validierung durch Hörbarkeitstest

Das Resultat der Berechnungen stellt eine doppelt verkettete Liste von Interaktionspunkten (Aperturpunkte auf der Beugungskante) dar, welche als Satz von vollständigen Beugungsparametern in die akustische Simulation der Schallausbreitung übergeben werden kann, und nicht mehr Teil dieser Arbeit ist. Der Einfachheit halber werden nur konvexe Polygonobjekte betrachtet, bei denen keine Kombination von Beugung und Reflexion auftreten kann [2].

Gradientenbildung der Beugungsordnung

Zunächst wird sowohl ausgehend von der Quelle als auch vom Empfänger auf der Polygonstruktur des Hindernisses bestimmt, mit welcher Beugungsordnung das entsprechende Polygon zu erreichen ist (Abbildung 2). Dazu markiert man sämtliche Polygone, welche in direkter Sichtverbindung stehen. Auf konvexen Hüllen trifft dies zu, wenn der Normalenvektor des betrachteten Polygons in die Halbebene zeigt, in der sich Quelle/Empfänger befinden.

Anschließend wird, ausgehend von den markierten Polygonen, eine Gradientenbildung der Ordnung durchgeführt, welche iterativ über die Kanten der Polygone in den Schattenbereich wandert, und dabei bisher nicht erreichte Polygone mit den entsprechenden Beugungsordnungen belegt. Die resultierenden Beugungsgradienten umschließen das Hindernis bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist (Abbildung 1b und Abbildung 1c).

Als letzten Schritt kombiniert man die beiden Gradienten von Quelle und Empfänger. Überschneiden sich diese in gewissen Polygonen der Beugungskontur, muss ein valider Beugungspfad zwingend über dieses Polygon verlaufen (Abbildung 1d und 1e). Sämtliche möglichen Kandidaten für einen Ausbreitungspfad können so ermittelt und im nächsten Schritt überprüft werden

Problemreduktion durch sukzessive Rotation

Die ermittelten Pfadkandidaten aus der Gradientenkontur stellen eine übergeordnete Menge von Pfaden über Beugungskanten dar, die zu diesem Zeitpunkt noch nicht überprüft wurden. Um nun das Huygens-Fresnel-Prinzip zu erhalten, stellt sich die Frage, unter welchen Winkeln die betrachteten Beugungskanten überlaufen werden. Da allerdings die zu ermittelnden Werte mit der Quell- und der Hörerposition verknüpft sind, kann dies zunächst nur über die Lösung eines Gleichungssystems mit den entsprechenden Randbedingungen erfüllt werden. Eine andere Betrachtungsweise, die hier vorgestellt wird, reduziert die Komplexität des vorliegenden Problems um eine Dimension (von 3D auf 2D), indem der betrachtete Kandidat einer sukzessiven Rotation unterworfen wird, um die entsprechenden Beugungskanten in die darauf folgende Polygonebene zu projizieren. Diese rotatorische Projektion erhält die geforderten Winkelbeziehungen und kann von der Quelle, vom Hörer oder von beiden Richtungen aus durchgeführt werden, da sie grundsätzlich nur von den zurückliegenden Informationen abhängt. Abbildung 2 zeigt exemplarisch, wie die Problemreduktion von der Quelle aus durchgeführt werden kann. Betrachtet man sich das Ergebnis wird ersichtlich, dass die sich anschließende Validierung, ob der Pfadkandidat einen gültigen Ausbreitungspfad darstellt, in einem dimensionsreduzierten Raum erfolgen kann (Abbildung 3).

Validierung durch Hörbarkeitstest

Der Hörbarkeitstest führt eine schrittweise Validierung des Pfadkandidaten durch, indem sämtliche Schnittpunkte der Verbindungslinie zwischen Quelle und Empfänger im reduzierten Raum (2D) bestimmt werden. Kreuzt die Gerade die Beugungskanten in der richtigen Reihenfolge und ist der Aperturpunkt innerhalb der Grenzen der endlichen Kante, wird dieser Pfad als valide markiert. Andernfalls kann der Kandidat unmittelbar verworfen werden, da eine Ausbreitung unter den geforderten Voraussetzungen nicht erfolgen kann (Abbildung 4).

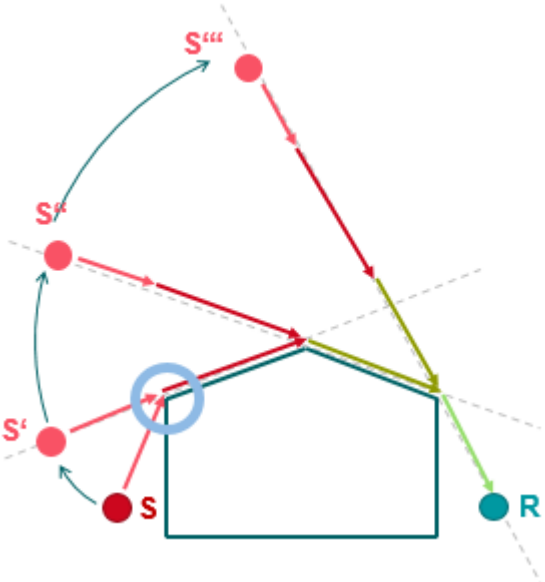

Abbildung 3: Problemreduktion durch sukzessive Rotation der Quelle über die ermittelten Beugungskanten, bis Empfänger direkt sichtbar ist (hier zur vereinfachten Darstellung von 2D zu 1D)

Ausblick

Die a-priori Abbruchkriterien stellen ein Instrument zur Einstellung des vorgeschlagenen Algorithmus dar, welcher letztendlich natürlich eine Parametererzeugung für die akustische Simulation implementiert. Die Wahl der entsprechenden Parameter kann sich massiv auf die Pfadermittlung auswirken und es fehlt an dieser Stelle noch an Erfahrungswerten, in welcher Weise sich die Bedingungen auf das vollständige Ergebnis (Impulsantwort) auswirken. Hierzu sind umfangreiche technische Überprüfungen und Verifizierungen durch Hörversuche notwendig, die Gegenstand der aktuellen Untersuchung sind.

Außerdem sind die Ausführungen bis hierher auf Geometrien angewendet worden, die sich auf konvexe Hüllen beschränken. Die Kombination aus Reflexion und Beugung, die zweifelsohne ein deutlich komplizierteres Problem darstellt, ist der nächste logische Schritt basierend auf den dargestellten Überlegungen.

Danksagung

Dieser Beitrag wurde im Rahmen des Forschungsprojekts mit dem Thema „Auralisation von urbanen Umgebungen - Echtzeitsimulation von Beugung“ (DFG, VO 600/39-1) verfasst, welcher durch Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziert wird.

Referenzen

[1] J. Borish, “Extension of the image model to arbitrary polyhedra,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 75, no. 6, pp. 1827–1836, 1984.

[2] N. Tsingos, T. Funkhouser, A. Ngan, and I. Carlbom, “Modeling Acoustics in Virtual Environments Using the Uniform Theory of Diffraction,” in *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer*

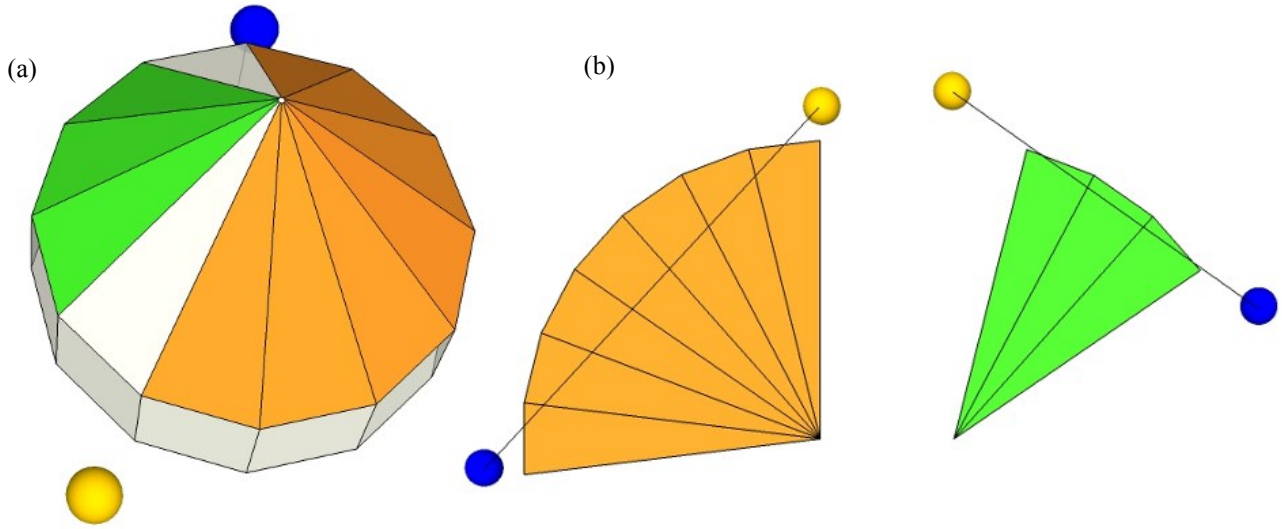

Abbildung 4: (a) zwei Pfadkandidaten (grün, orange) mit unterschiedlicher kombinierter Beugungsordnung (4, 8)
(b) Reduziertes Problem (2D) durch sukzessive Rotation und Schnittpunkttest (Validierung)

Graphics and Interactive Techniques, 2001, pp. 545–552.

[3] Z. Maekawa, "Noise reduction by screens," *Applied Acoustics*, vol. 1, no. 3, pp. 157–173, 1968.

[4] H. Medwin, "Shadowing by finite noise barriers," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 69, no. 4, pp. 1060–1064, 1981.

[5] A. D. Pierce, "Diffraction of sound around corners and over wide barriers," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 55, no. 5, pp. 941–955, 1974.

[6] P. Svensson, R. Fred, and J. Vanderkooy, "An analytic secondary source model of edge diffraction impulse responses," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 106, p. 2331, 1999.

[7] A. Pohl and U. Stephenson, "A combination of the sound particle simulation method and the radiosity method," *Building Acoustics*, vol. 18, no. 1–2, pp. 97–122, 2011.

[8] D. Schröder and A. Pohl, "Real-time hybrid simulation method including edge diffraction," *EAA auralization symposium*, vol. 39, 2009.

[9] M. Taylor, A. Chandak, Z. Ren, C. Lauterbach, and D. Manocha, "Fast edge-diffraction for sound propagation in complex virtual environments," in *EAA auralization symposium*, 2009, pp. 15–17.

[10] N. Tsingos, T. Funkhouser, N. Addy, and I. Carlbom, "Geometrical theory of diffraction for modeling acoustics in virtual environments," 2000.