

# Vergleich unterschiedlicher Verfahren in der Strahlverfolgung

Bernd Dürrer, Institut für Kommunikationsakustik, Ruhr-Universität Bochum

## Einführung

Die akustische Simulation eines Raumes kann mit Hilfe virtueller Schallquellen (VSQ) erfolgen: Dabei werden Effekte wie Beugung und Streuung vernachlässigt und die Schallausbreitung wird entsprechend den Regeln der geometrischen Akustik modelliert.[1] Ein Schallausbreitungsweg, der über geometrische Reflexion den Empfänger erreicht, wird dabei durch eine VSQ nachgebildet (auch „Spiegelschallquelle“ genannt). Als erster Simulationsschritt ist hierzu die Bestimmung der geometrischen Orte dieser virtuellen Schallquellen erforderlich. Diese geometrische Simulation kann entweder mit dem Spiegelschallquellen- oder einem Strahlenverfolgungsverfahren erfolgen. Nachteil des Spiegelschallquellenverfahrens ist, dass der Rechenaufwand exponentiell mit der Ordnung der Reflexion ansteigt, während er beim Strahlenverfolgungsverfahren linear mit der Zahl ausgesandter Strahlen zunimmt: Allerdings werden mit dem Strahlenverfolgungsverfahren nicht sicher alle VSQ detektiert.[2]

## Strahlenverfolgungsverfahren

Das Strahlenverfolgungsverfahren lässt sich in drei Teilaufgaben aufteilen:

- ein Strahlenstarter, der eine genügend hohe Zahl von Strahlen erzeugt
- Strahlverfolgung mit geometrischer Reflexion an den Wänden, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist
- ein Strahldetektor, der „Kandidaten“ für VSQ liefert: Je nach Detektor sind weitere Tests nötig.

## Sphärischer Strahlenstarter und Detektoren

Beim sphärischen Strahlenstarter ergeben sich die Startrichtungen der Strahlen durch eine näherungsweise gleichförmige Verteilung auf einer Kugeloberfläche. Aufgrund der Symmetrie reicht es, die Startvektoren für ein Achtelsegment der Kugel zu berechnen: Die übrigen Richtungen ergeben sich durch Umkehr des Vorzeichens einer Komponente des Startvektors. Die  $90^\circ$  Elevationswinkel werden dabei in  $n$  Segmente aufgeteilt: Für jeden Elevationswinkel wird eine unterschiedliche Zahl von Startvektoren berechnet, so dass der Abstand der Strahlen ungefähr konstant ist. Der sphärische Strahlenstarter kann entweder mit dem Kugel- oder dem Kegeldetektor benutzt werden.

Beim Kugeldetektor befindet sich ein konstantes endliches Volumen in Form einer Kugel am Empfängerpunkt: Die Detektionsbedingung ist dann erfüllt, wenn ein Strahl die Kugel schneidet. Hierbei ist die Wahl eines angemessenen Kugelradius erforderlich: Bei zu großem Radius kommt es zu sehr vielen Mehrfachdetektionen, während bei zu kleinem Radius eine große Zahl VSQ nicht gefunden wird.

Beim Kegeldetektor wird ein gerader Kreiskegel betrachtet, in dessen Symmetrieachse der Strahl verläuft. Die De-

tektionsbedingung ist dann erfüllt, wenn der Empfängerpunkt innerhalb des Kegels liegt. Hierbei ist die Wahl eines angemessenen Öffnungswinkels für den Kegel erforderlich: Die Zahl von Mehrfachdetektionen hängt ab von der Überlappung der Kegel. Aufgrund der zunehmenden Weite des Kegels kommt es mit steigender Strahllänge zu einer steigenden Zahl ungültiger Detektionen.

## Mehrfachdetektion

Sowohl beim Kugel- als auch beim Kegeldetektor ist der Fall denkbar, dass die Detektionsbedingung für zwei benachbarte Strahlen erfüllt wird, die den gleichen Schallweg (also die gleiche VSQ) beschreiben. Damit für den gleichen Schallweg nicht mehrere VSQ erzeugt werden, wird ein Kriterium benötigt, mit dem die Eindeutigkeit eines Schallweges bzw. einer VSQ überprüft werden kann. Ein Schallweg wird eindeutig beschrieben durch einen Tupel, der aus den reflektierenden Flächen gebildet wird. Für jeden Strahl ist ein solcher Tupel gegeben: Bei Erfüllung der Detektionsbedingung wird geprüft, ob dieser Tupel bereits bei einer vorangegangenen Detektion aufgetreten ist. Zur schnelleren Suche können die Tupel in einer Baumstruktur gespeichert werden.[3]

Zu jedem Schallweg gehört jedoch auch eine VSQ mit einer eindeutigen Position: Der Test auf Mehrfachdetektion kann daher auch durch Vergleich der aktuellen VSQ-Position mit den Positionen bereits gefundener VSQ erfolgen. Auch hier kann die Suche beschleunigt werden, indem man für jede Ordnung der Reflexion eine eigene Liste führt: Bei Detektion einer VSQ  $n$ -ter Ordnung muss der Vergleich dann nur mit den bereits gefundenen VSQ der Ordnung  $n$  durchgeführt werden.

## Ikosaederstarter und Pyramidendetektor

Bei diesem Strahlenstart- und Detektionsverfahren werden Mehrfachdetektionen von vornherein ausgeschlossen.[4] Das Detektionsprinzip ist ähnlich wie beim Kegeldetektor: Allerdings verläuft hier der Strahl im Inneren einer dreiseitigen Pyramide. Die Detektionsbedingung ist dann erfüllt, wenn der Empfängerpunkt innerhalb der Pyramide liegt. Die Berechnung der Startrichtungen erfolgt mit Hilfe eines Ikosaeders. Um die Strahldichte zu erhöhen, werden die dreieckigen Ikosaederflächen in kleinere Teildreiecke unterteilt. Bei einer Reflexion müssen allerdings nicht nur der Strahlvektor selbst, sondern auch die Vektoren, die die Pyramide aufspannen, reflektiert werden.

## Gültigkeitsprüfung

Unabhängig von Strahlenstarter und Detektor trifft ein Strahl praktisch nie exakt den Empfängerpunkt: Je nach Detektionsbedingung kann der kürzeste Abstand zwischen Strahl und Empfängerpunkt sehr groß sein. In jedem Fall muss daher die Gültigkeit einer VSQ geprüft werden. Hierzu wird zunächst die Position der VSQ exakt

bestimmt, indem die Schallquelle an den reflektierenden Flächen gespiegelt wird, die der Strahl bis zum Erfüllen der Detektionsbedingung getroffen hat.[2] Die Gültigkeit des Schallweges kann mit drei unterschiedlichen Verfahren geprüft werden.

Bei der Sichtbarkeitsprüfung wird (ausgehend von der exakten VSQ-Position) jeder Reflexionspunkt noch einmal exakt bestimmt. Falls ein Reflexionspunkt nicht innerhalb des Polygonzuges liegt, der die reflektierende Fläche umfasst, wird die VSQ verworfen. Falls auf einem Strahlenabschnitt zwischen zwei Reflexionspunkten noch eine andere Fläche getroffen wird, wird die VSQ ebenfalls verworfen.

Bei der einfachen Strahlrückverfolgung wird ein Strahl vom Empfänger zur Quelle gestartet: Die Strahlrichtung ist die entgegengesetzte Richtung, unter der der Schall von der VSQ beim Empfänger eintrifft. Sobald eine andere Fläche als auf dem Hinweg getroffen wird oder der Strahl nicht (im Rahmen der Rechengenauigkeit) exakt am Ort der Quelle eintrifft, wird die VSQ verworfen.

Die vollständige Strahlrückverfolgung arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie die einfache: Allerdings wird hier eine VSQ nicht sofort verworfen, falls der Strahl eine andere Fläche als auf dem Hinweg trifft. Die VSQ wird nur dann nicht verworfen, wenn der Strahl nicht wieder am Ort der Quelle eintrifft.

### **Voxelrasterung**

Um die Strahlverfolgung zu beschleunigen, kann der Raum in kleinere Volumenelemente („Voxel“) aufgeteilt werden: Ein Strahl befindet sich immer in genau einem Voxel. Bei der Suche nach dem nächsten Reflexionspunkt müssen dann nicht mehr alle Wände überprüft werden, sondern nur die, die sich ebenfalls in diesem Voxel befinden. Hierzu muss aber vor der eigentlichen Strahlverfolgung bestimmt werden, in welchen Voxeln sich eine reflektierende Fläche befindet.

Eine reflektierende Fläche wird durch einen geschlossenen Polygonzug beschrieben, der innerhalb einer Ebene liegt; die Ebene selbst liegt beliebig im Raum. Für jeden Polygonzug lässt sich ein Rechteck minimaler Größe bestimmen, das den Polygonzug vollständig umfasst. In einer ersten Phase werden die Voxel bestimmt und markiert, in denen die einzelnen Abschnitte des Polygonzuges liegen: Dies bedeutet, dass die Voxel, die die Wandebene so schneiden, dass die Schnittfläche vollständig im Inneren des Polygonzuges liegt, noch nicht markiert sind.

In einer zweiten Phase werden für jeden Voxel alle Wände geprüft, für die noch keine Wandmarkierung existiert. Zunächst wird mit einer auf die dritten Dimension erweiterten Variante des Cohen-Sutherland-Clipping-Tests geprüft, ob das Wandrechteck den Voxel schneidet. Falls ja, wird eine Voxel-Ecke mit allen anderen Ecken verbunden: Für jede Verbindung wird der Schnittpunkt mit der Wandebene bestimmt. Falls dieser Schnittpunkt im Inneren des Polygonzuges liegt, wird eine Markierung für diese Wand angelegt.[5]

### **Vergleich der Verfahren**

Beim Vergleich der Strahlenstarter erweist sich der Ikosaederstarter erwartungsgemäß als aufwendiger: Zusätzlich zur Strahlrichtung müssen auch die Pyramidenvektoren berechnet und bei der Strahlverfolgung ebenfalls reflektiert werden.

Bei der Strahlverfolgung bringt die Anwendung der Voxelrasterung einen klaren Vorteil: Ohne Voxelraster steigt der Rechenaufwand in etwa linear mit der Zahl der Wände. Bei Anwendung des Voxelrasters muss für komplexe Raumgeometrien etwa der gleiche Aufwand getrieben werden wie für einfache.

Beim Mehrfachdetektionstest erweist sich der Vergleich der Positionen der VSQ als günstiger als die Speicherung von Wand-Tupeln in einer Baumstruktur. Insbesondere wenn für jede Ordnung der Reflexion eine eigene Positionsliste gepflegt wird, ist der Aufwand für den Mehrfachdetektionstest extrem gering. Infolgedessen fällt auch der Vorteil von Ikosaederstarter und Pyramidendetektor nicht weiter ins Gewicht: Der Aufwand für den Mehrfachdetektionstest ist geringer als der Aufwand für die bei diesem Starter und Detektor zusätzlich notwendigen Berechnungen.

Bei der Gültigkeitsprüfung ist der Unterschied zwischen Sichtbarkeitsprüfung und einfacher Strahlrückverfolgung vernachlässigbar gering. Die vollständige Strahlrückverfolgung ist aufwendiger, findet aber bei gleicher Strahldichte mehr gültige virtuelle Schallquellen. Insgesamt ist die durchschnittliche Rechenzeit pro VSQ größer: Die Erhöhung der Strahldichte und Gültigkeitsprüfung mit Sichtbarkeitsprüfung oder einfacher Strahlrückverfolgung ist also letztendlich günstiger.

### **Fazit**

Insgesamt liefern die einfachen Verfahren bestes Laufzeitverhalten und Skalierbarkeit:

- sphärischer Strahlenstarter
- Kegeldetektor
- Positionsüberprüfung als Mehrfachdetektionstest
- Sichtbarkeitsprüfung

Durch Einsatz der Voxelrasterung kann der Einfluss der Komplexität der Raumgeometrie auf die Gesamtrechenzeit minimiert werden. Trotzdem gilt natürlich weiterhin, dass geometrische Details nur soweit nachgebildet werden sollten, wie es im Rahmen der geometrischen Akustik sinnvoll ist.

### **Literatur**

- [1] Borish (1984). „Extension of the image model to arbitrary polyhedra,” *J. Acoust. Soc. Am.* 75.
- [2] Lehnert und Blauert (1992). „Principles of binaural room simulation,” *Appl. Acoust.* 36.
- [3] Naylor (1993). „Computer modeling and auralisation of sound fields in rooms,” *Appl. Acoust.* 38.
- [4] Lewers (1993). „A combined beam-tracing and radiant exchange computer-model of room acoustics,” *Appl. Acoust.* 38.
- [5] Lehnert, H., Dürrer, B. (1993). „Untersuchungen zur Optimierung des Rechenzeitverhaltens des Strahlverfolgungsverfahrens,” DAGA '93.