

# Welche Rechenleistung wird für die Echtzeitimplementierung von Virtueller Akustik benötigt?

Andreas Silzle

Institut für Kommunikationsakustik, Ruhr-Universität Bochum; Email: silzle@ika.rub.de

## Einleitung

Bei der Programmierung einer echtzeitfähigen dreidimensionalen Tonwiedergabe über Kopfhörer oder Lautsprecher ist auf eine sehr effiziente Implementierung zu achten. Hier soll ein Überblick über die benötigten Teilalgorithmen und die dafür benötigte Anzahl an Rechenoperationen am Beispiel einer PC-Implementierung gegeben werden. Es werden die wichtigsten Parameter (Ordnung der Spiegelschallquellen, Filtertyp und -länge) angegeben, sowie deren Einfluss auf die Gesamtrechenzeit dargestellt. Diese Parameter werden in Zusammenhang mit der zu erwartenden Qualität der Wiedergabe gesetzt.

## Anzahl der Spiegelschallquellen

Eine gute Einführung in auditive virtuelle Umgebungen wird von Novo gegeben, [1]. Für die Berechnung des Schallfeldes in einem virtuellen Raum wird bei Echtzeitanwendungen die Spiegelschallquellenmethode angewendet. Bei dieser Methode werden die Reflexionen an den Wänden durch sogenannte Spiegelschallquellen ersetzt. Dazu wird die Raumgeometrie und die Schallquellen- und Abhörposition benötigt. Wie sich später zeigen wird, hat die Anzahl der zu berechnenden Spiegelschallquellen den größten Einfluss auf die insgesamt benötigte Rechenleistung. Die einfachste Abschätzung der Anzahl erfolgt mit dem Potenzgesetz (1). Die Anzahl der Raumbegrenzungsflächen ist  $n_s$ ,  $o$  die Ordnung.

$$N_1 = 1 + n_s^o \quad (1)$$

Die maximale Anzahl von möglichen Spiegelschallquellen in einem Rechteckraum sind nach Kirszenstein [2] wie in (2) zu berechnen. Mit  $k$  wird die Anzahl der physikalisch nicht möglichen Spiegelschallquellen berücksichtigt.<sup>1</sup>

$$N_2 = 1 + n_s + n_s(n_s - 1) \left( \sum_{n_i=2}^{n_i=o} (n_s - 2)^{n_i-2} - k \right) \quad (2)$$

In einer geometrisch begründeten Abschätzung von Cremer [3] ergibt sich die Anzahl der Spiegelschallquellen für einen Rechteckraum.

$$N_r = \frac{4\pi c^3}{3V} t^3 \quad (3)$$

Das Volumen des Raumes ist  $V$ , die Schallgeschwindigkeit  $c$  und die Zeit  $t$ . Diese Formel ist gültig für:

$$t \gg \frac{\sqrt[3]{V}}{c} \quad (4)$$

Die Formel (3) ist nach Vorländer [4] auch für nicht rechteckige Räume anwendbar. Sie ist aber nicht von der Ordnung der Spiegelschallquellen abhängig, sondern von der Zeit. Kuttruff [5] definiert eine durchschnittliche Frequenz, mit der Reflexionen auftreten.

$$n = \frac{cS}{4V} \quad (5)$$

Die Invertierung kann als durchschnittliche Zeit zwischen zwei Reflexionen angesehen werden, das heißt als zeitlicher Abstand von einer Ordnung zur nächsten. Wenn (5) nun in (3) eingesetzt

wird, ergibt sich (6). Damit ergibt sich eine Formel, in der die Anzahl der Spiegelschallquellen von der Ordnung abhängig ist. Es wird mit  $o+1$  gerechnet, um die halbe Wegstrecke oder Zeit von der Schallquelle zur ersten Wand zu berücksichtigen und ebenfalls eine im Durchschnitt halbe Wegstrecke von der letzten Reflexion bis zum Empfänger.

$$N_r = \frac{4\pi c^3}{3V} \left( (o+1) \frac{4V}{cS} \right)^3 \quad (6)$$

Abbildung 1 zeigt in den ersten drei Kurven den Verlauf dieser verschiedenen Formeln, die vierte Kurve zeigt die Anzahl der Spiegelschallquellen über der Ordnung eines Rechteckraumes nach einem Sichtbarkeitstest und die fünfte Kurve die Anzahl in einem nicht rechteckigen Raum. Die gute Übereinstimmung von Formel (6) und den beiden Kurven der ausgezählten Räume legen nahe, dass mit dieser Formel für „normal“ geschnittene Räume eine gute Abschätzung der Anzahl der sichtbaren Spiegelschallquellen getroffen werden kann. Die Raumabmessungen von Raum 1 sind  $10*6*4m$ , die von Raum 2  $\sim 6*4*3m$  (L\*B\*H).

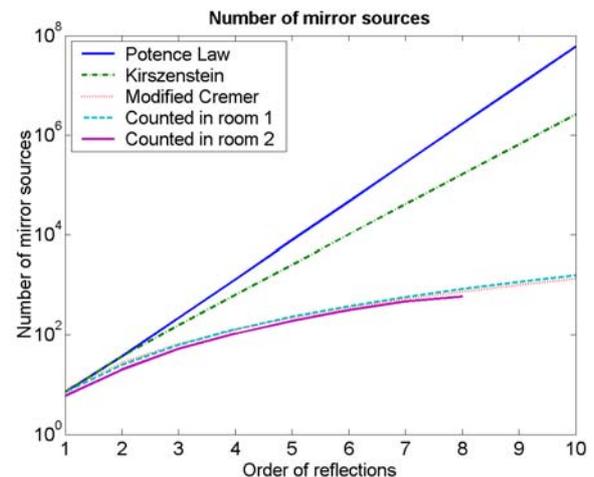


Abbildung 1: Vergleich zwischen der Abschätzung der Anzahl der Spiegelschallquellen und den nach einem Sichtbarkeitstest gezählten.

In einer dynamischen virtuellen Umgebung bewegen sich die Schallquellen und u.U. auch der Hörer, d.h. die Positionen der Spiegelschallquellen und ihre Sichtbarkeit müssen laufend neu berechnet werden.

## Anzahl der Rechenoperationen

Für die Audioverarbeitung einer Spiegelschallquelle, die Auralisation, ergeben sich die in Abbildung 2 dargestellten Verarbeitungsböcke. Zuerst muss die Richtcharakteristik der Schallquelle modelliert werden. Dann benötigt die Schallwelle eine bestimmte Zeit, bis sie die erste Raumbegrenzung erreicht. Diese Verzögerung kann aufgrund der bewegten Schallquelle nicht mit einem festen Wert beschrieben werden, sondern muss präzise mit einem Interpolationsfilter berechnet werden, siehe [6]. Die Reflexion an der Wand wird mit einem frequenzabhängigen Filter beschrieben. Diese beiden Filtertypen wiederholen sich mit u.U. anderen Parametern mit der Ordnung der Reflexion. Am Ende der Signalverarbeitungskette sind

<sup>1</sup> In einem Rechteckraum ist eine Reflexion an Wand 1 dann Wand 2 und dann wieder Wand 1 nicht möglich. In Abbildung 1 ist  $k=0$ .

Außenohrübertragungsfunktionen (HRTFs) für die Kopfhörerwiedergabe notwendig. Bei Lautsprecherwiedergabe steht an deren Stelle ein Panning-Algorithmus.

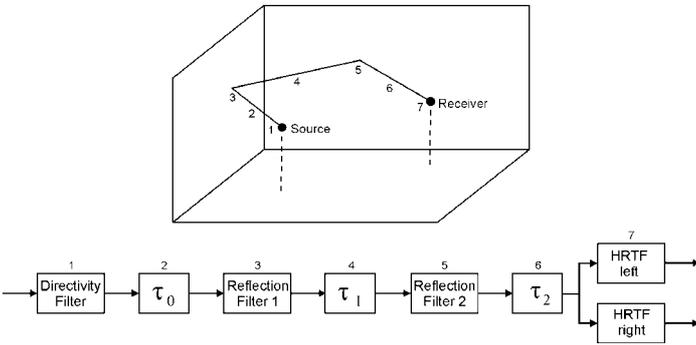


Abbildung 2: Auralisation einer Spiegelschallquelle zweiter Ordnung, [6] and [1]

Diese Verarbeitungskette lässt sich alternativ folgendermaßen darstellen, Abbildung 3. Die Buchstaben in Klammern hinter den Filternamen stehen für die Anzahl der benötigten Operationen.

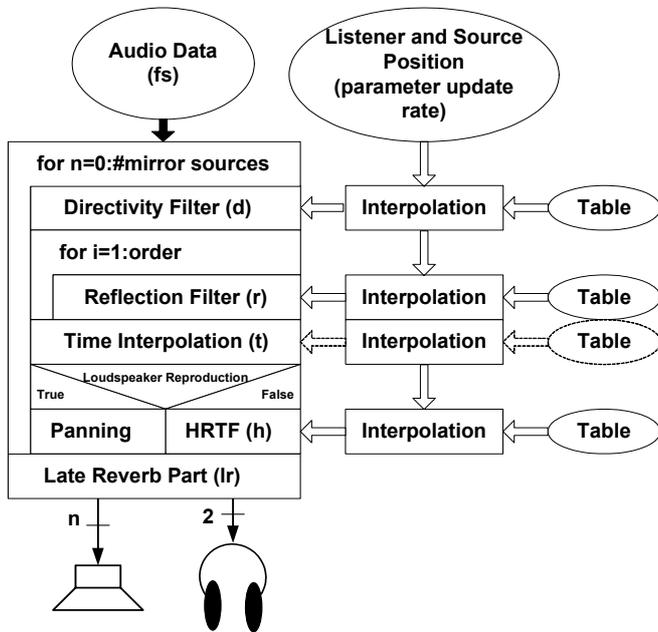


Abbildung 3: Audioverarbeitungskette für Virtuelle Akustik

Die Anzahl der notwendigen Rechenoperationen lässt sich folgendermaßen abschätzen.

$$all = (d + t + 2 \cdot h + o \cdot r) \cdot f_s \cdot n(o) + lr \quad (1)$$

Wobei  $f_s$  die Abtastrate ist,  $o$  die Ordnung der Spiegelschallquelle und  $n(o)$  die Anzahl der Spiegelschallquellen in Abhängigkeit von der Ordnung. Die Anzahl der Rechenoperation des Hallanteils, der nicht mit der dynamischen Spiegelschallquellenmethode berechnet wird, ist  $lr$ .

Die Qualität einer Auralisation lässt sich nur in Abhängigkeit von einer Applikation bestimmen. Die folgende Tabelle 1 stellt eine einfache Unterteilung in drei Stufen dar, die sich aufgrund praktischer Erfahrung ergeben hat. Es wird der Einfachheit halber davon ausgegangen, dass die Filter als FIR-Filter implementiert sind, d.h. eine Rechenoperation entspricht einer Multiplikation plus einer Addition. Mit einer Abtastrate von  $f_s=44100\text{Hz}$  und ohne Berücksichtigung des konstanten späten Nachhallanteiles ( $lr=0$ ) ergeben sich die folgenden Kurven, Abbildung 4.

Quality level		Low	Middle	High
Directivity filter	d	0	0	32
Reflection filter	r	32	32	128
Time Interpolation	t	3	32	32
HRTF	h	64	96	128

Tabelle 1: Filterlängen für die unterschiedlichen Qualitätsstufen

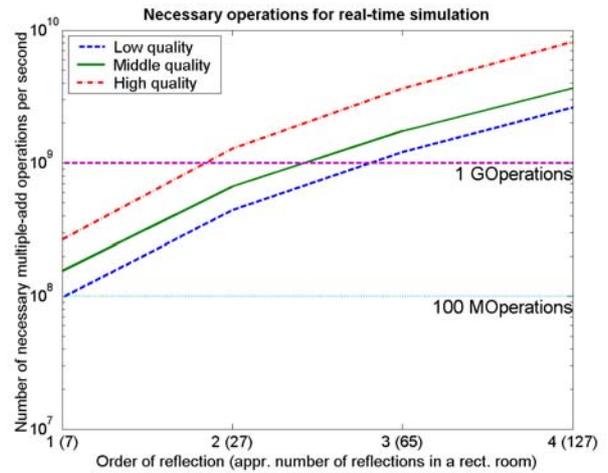


Abbildung 4: Anzahl der Operationen für eine Echtzeitsimulation pro Sekunde

Der sehr oft verwendete Signalprozessor DSP 56300 erreicht gerade 100MIPS, die gleiche Rechenleistung wurde von einem Pentium III von 1GHz erreicht (10 Prozessorzyklen für eine Multiplikation), [7]. Der TigerSHARC-DSP hat theoretisch 1,5 GFLOPS. Ein Prozessor der Pentium IV-Kategorie erreicht real mit Hilfe der Intel-Signalverarbeitungsbibliothek ungefähr 1 GFLOPS.

### Zusammenfassung

Die Echtzeitimplementierung von Virtueller Akustik ist sehr rechenintensiv. Die Anzahl der sichtbaren Spiegelschallquellen lässt sich ab der zweiten Ordnung mit der dritten Potenz der Ordnung abschätzen. Für eine Simulation mit zweiter Ordnung Reflexionen wird ein Prozessor der Pentium IV-Kategorie benötigt. Eine exakte Auswahl der wirklich wichtigsten Reflexionen ist zur Zeit immer noch notwendig und die effektivste Art der Optimierung. Eine Einsparung bei der Filterimplementierung geht eher zu Lasten der Qualität.

### Literaturverzeichnis

- [1] Pedro Novo, Auditory Virtual Environments, DAGA 02, Bochum, Germany, 2002
- [2] J. Kirszenstein, An Image Source Computer Model for Room Acoustic Analysis and Electroacoustic Simulation, Applied Acoustics 17 (1984), Seite 275-290
- [3] Lothar Cremer, Geometrische Raumakustik (Band I), S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1948, Seite 27
- [4] Michael Vorländer, Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm, J. Acoust. Soc. Am. 86(1), July 1989, pp. 172-178
- [5] Heinrich Kuttruff, Room Acoustics (second edition), Applied Science Publishers Ltd, Essex, England, 1979
- [6] Holger Strauss: Simulation instationärer Schallfelder für auditive virtuelle Umgebungen (Ph.D.). Fortschr.-Ber. VDI Reihe 10 Nr. 652. Düsseldorf: VDI Verlag 2000, ISBN 3-18-365210-2
- [7] <http://tech-www.informatik.uni-hamburg.de/lehre/ws2000/vl-audioverarbeitung/05-audiosysteme.pdf>

Der Autor bedankt sich herzlich bei seinen beiden Kollegen Dr. Noha Korany und Dr. Pedro Novo für die Anregungen und Diskussionen zum vorgetragenen Thema.