






# Virtuelle Realität und Simulation

## Sound-Rendering

G. Zachmann  
 Clausthal University, Germany  
[cg.in.tu-clausthal.de](http://cg.in.tu-clausthal.de)

## Sound in VR

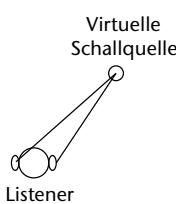
- Vollständige Immersion nur, wenn alle Sinne richtig u. konsistent stimuliert werden.  
 (Schau Thriller im Fernsehen ohne Ton! ☺)
- Wozu wird Hören gebraucht:
  - Lokalisieren von (noch) nicht sichtbaren Geräuschquellen,
  - Zweitwichtigstes Sinnesorgan zum Zurechtfinden / zur Navigation,
  - Erzeugung eines Raumeindrucks
- Höreindrücke:
  - "groß" (späte Reflexionen),
  - "unterirdisch" (viele Echos),
  - "dumpf" (keine Reflexionen),
  - "draußen" (keine Echos, aber Fremdgeräusche).
- Wie rendert man Sound?

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 Sound-Rendering 2

## Simple Methoden

- Motoren-Geräusch (Spiele, Flugsimulator, ..)
  - Sound = Funktion von Geschwindigkeit, Benzinverbrauch, Gas, Fliehkräfte, Orientierung, etc.
  - Sound ist vorab aufgenommen
- "3D"-Sound:
  - Lautstärke-Differenz
  - Hall-Effekt ("*reverberation*")
- Wie rendert man Sound *realistisch* und in *Echtzeit* ?
- Unterschiede zwischen Licht und Schall:
  - Geschwindigkeit
  - Wellenlänge

→ Macht Rendern von Sound so schwierig



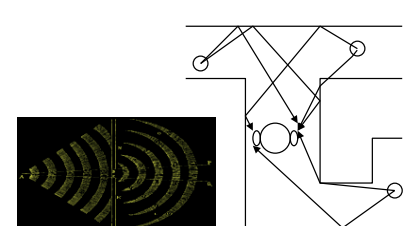
Virtuelle Schallquelle

Listener

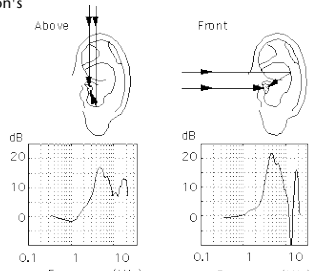
G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 Sound-Rendering 4

## Human Factors

- Akustische Effekte:
  - Reflexion (*reflection*),
  - Brechung (*refraction*),
  - Streuung,
  - Beugung (*diffraction*),
  - Interferenz.
- Ortungsfähigkeit des Ohrs:
  - Amplitudendifferenz,
  - Laufzeitunterschiede,
  - Änderungen des Spektrums durch Ohrmuschel und Kopf.



from Isaac Newton's *Principia* (1686)



Above

Front

dB

Frequency (kHz)

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 Sound-Rendering 5

## Mischen von Schallquellen

- $n$  Quellen aus verschiedenen Richtungen, jede sendet ein Signal  $s_i(t)$
- Dämpfung ("attenuation")  $a_i$  pro Quelle  $s_i$ :
 
$$a_i = \frac{e_i(\phi_i, \omega_i) e_r(\phi_i, \omega_i) v_i}{l_i}$$

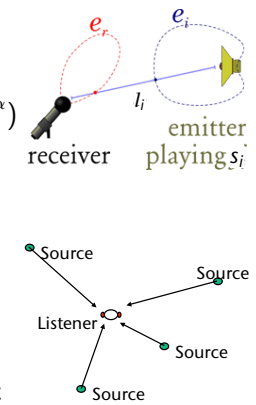
$$e_i(\phi, \omega) = \text{Abstrahlchar. z.B. } \frac{1}{2}(1 + \cos(\phi)^\alpha)$$

$$e_r = \text{Empfängerchar.}$$

$$v_i = \text{visibility, incl. Beugung, } \in [0, 1]$$

$$l_i = \text{Entfernung}$$
- Summe:
 
$$s(t) = \sum_i a_i s_i(t - \tau_i)$$

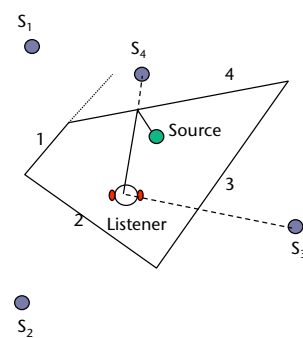
$$\tau_i = l_i/c, \quad c = \text{Schallgeschwindigkeit}$$



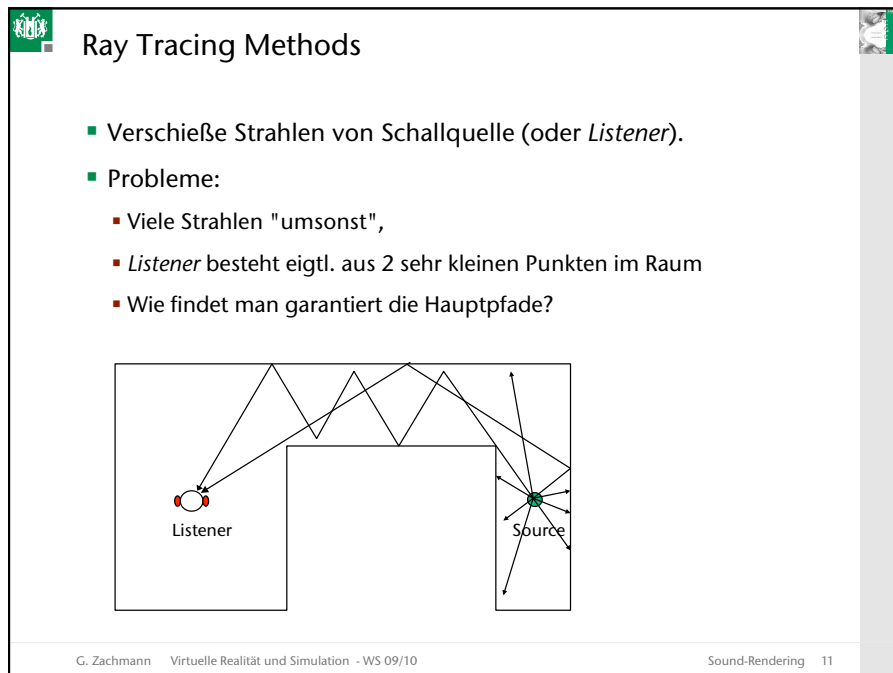
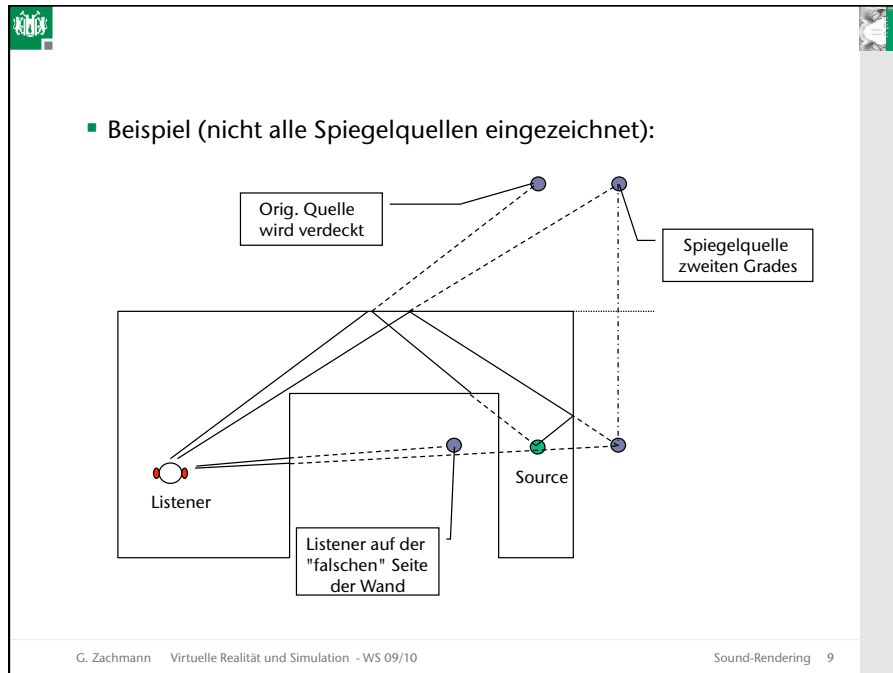
G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 Sound-Rendering 6

## Spiegelquellen-Methode ("image source")

- Zur schnellen Berechnung der Reflexionspfade
- Idee: konstruiere für jede Schallquelle und jede Wand eine "virtuelle" Schallquelle ("image source")
- Länge des Strahls  $\rightarrow$  Laufzeit, #Reflexionen  $\rightarrow$  Dämpfung
- Aufwand:  $O(n \cdot r)$ 
  - $n = \#$  Schallquellen,
  - $r = \#$  Wände.
- Probleme:
  - Alles neu berechnen, wenn sich Quellen bewegen
  - Nur Reflexionseffekt



G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 Sound-Rendering 8



## Beam Tracing

- *Beam* = ausgedehnter, sich aufweitender Strahl
- Damit lässt sich viel vorausberechnen, zur Laufzeit Strahlrückverfolgung
- *Beam-Tracing*:
  1. Sortiere Polygone entlang *Beam*,
  2. Für jedes Polygon, das *Beam* schneidet: spalte *Beam* auf in 2 oder mehr, bestimme Spiegelquelle für reflektierten *Beam*
  3. *Rekursion*

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 Sound-Rendering 12

The diagram illustrates the beam tracing process. A source  $S$  (green dot) emits a red beam that passes through a pink polygon and reflects off a dark brown polygon. The reflected beam is shown as a blue line. A virtual source  $S''$  (blue dot) is shown as the source of the reflected beam. Another virtual source  $S'$  (blue dot) is shown as the source of the original beam.

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 Sound-Rendering 13

## Sound-Rendering mit Beams

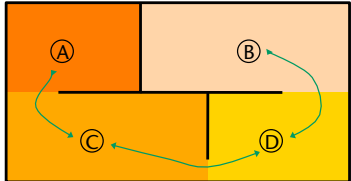
- Alle *Beams* berechnen: zu jedem *Beam* speichere:
  - zugehörige Quelle/Spiegelquelle;
  - spiegelndes Polygon;
  - *Vater-Beam*; Für gegebenen *Listener*:
  1. Bestimme alle enthaltenden *Beams*,
  2. Verfolge Strahlen zurück in Richtung der Quellen/Spiegelquellen über die Spiegelpolygone bis zum Ursprung mittels *Image-Source-Methode*,
  3. Signale aufaddieren.
  - Anzahl Reflexionen;
  - ursprüngliche Quelle;

→ "*Beam tree*".

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 Sound-Rendering 14

## Beschleunigung des *Beam-Tracings*

- Wie macht man *Beam-Tracing* schnell ?
- Idee: Berechne weitere Datenstruktur, die Szene in konvexe Zellen aufteilt.
  - Denn: Punkt in geschlossenem *Polyeder* "sieht" jedes Polygon;
- Definition *Zelle* :  
 "Zelle" ist ein Volumen des Raumes, mit der Eigenschaft:
  1. Das Volumen ist konvex;
  2. Das Innere des Volumens enthält keine Polygone.
- Zu jeder Zelle speichere:
  - Nachbarzellen ("*cell adjacency graph*"),
  - Rand-Polygone.



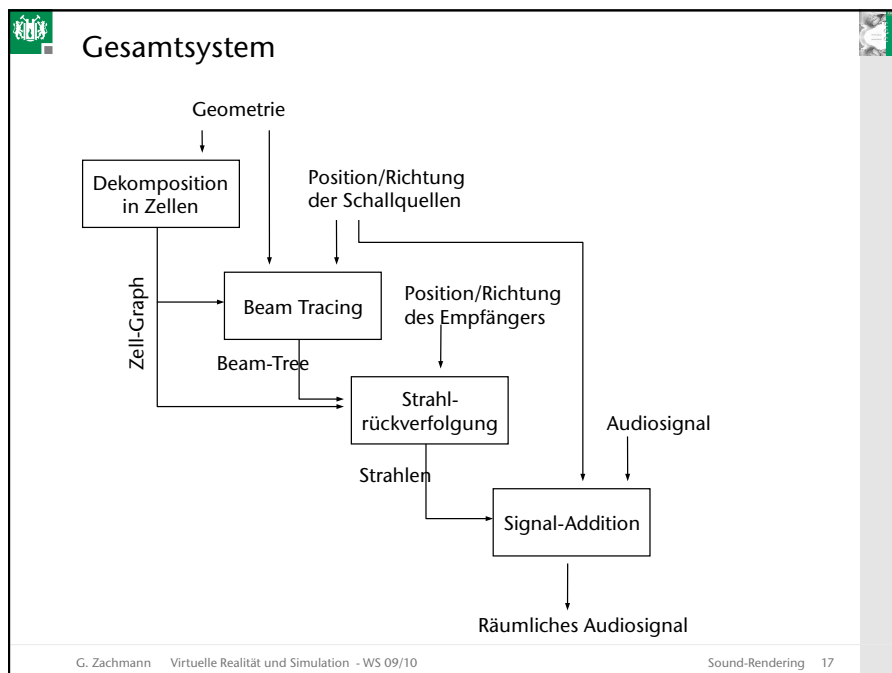
G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 Sound-Rendering 15



## Beam-Tracing mit Zellen

Gegeben Quelle, wie wird *Beam* "verschossen" und "beschnitten"?

1. Bestimme Zelle, in der der *Beam* anfängt  
(entweder von Punkt innerhalb der Zelle, oder vom Rand).
2. Für jedes Polygon am Rand: generiere gespiegelten *Beam*, falls Polygon getroffen, und schneide *Beam* ab.
3. Falls etwas "übrigbleibt" vom *Beam*, beginne wieder von vorne in der Nachbarzelle.
4. *Rekursion* mit den gespiegelten und den "übriggebliebenen" *Beams*.

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 Sound-Rendering 16





- Eigenschaften des Algorithmus':
  - Schnell
  - Auch Brechung schnell berechenbar
  - Auch Beugung berechenbar
  - Gut parallelisierbar

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 Sound-Rendering 18



**Real-Time Acoustic Modeling  
for Distributed Virtual Environments**

Tom Funkhouser, Patrick Min  
Princeton University

Ingrid Carlbom  
Bell Laboratories

SIGGRAPH 1999

G. Zachmann Virtuelle Realität und Simulation - WS 09/10 Sound-Rendering 19