

**G. Schupp, K. Naßhan, U. Stephenson, W. Fasold**

## Hineinhören in geplante Räume

### Demonstrationszentrum zur akustischen Virtuellen Realität

#### 1. Einführung

Virtuelle Realität (VR) bedeutet simulierte Umgebung. Ein Computer erfaßt die Aktionen eines Betrachters („Cybernauten“) und reagiert unmittelbar durch eine entsprechende Änderung der dargestellten Umgebung. Die akustische Simulation der Eigenschaften von nicht existenten Räumen ist bisher wenig bekannt, obwohl die ersten Schritte hierzu schon vor über 20 Jahren erfolgten. Auch im Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) werden schon seit langem raumakustische Simulationsprogramme entwickelt und angewendet. Der zweite Schritt nach der Simulation ist die Auralisation, d.h. das Hörbarmachen von Schallfeldern in Räumen [1]. Dabei ist nicht jene Erzeugung von fiktiven Geräuschen gemeint, die man von Computerspielen her kennt. Vielmehr werden natürliche Geräusche (Musik, Sprache, Maschinengeräusche) so dargeboten, wie sie in einer ganz spezifischen Umgebung klingen würden. Damit kann man bereits im Planungsstadium in Auditorien „hineinhören“, und so einen Eindruck von ihren künftigen akustischen Eigenschaften bekommen.

Seit 1993 gibt es ein Gemeinschaftsprojekt der Fraunhofer-Institute IAO, IBP, IGD und IPA zur Demonstration visueller und akustischer Realität. Das IBP übernahm dabei den akustischen Teil.

Die Rechenzeiten raumakustischer Simulation sind, bedingt durch prinzipielle Unterschiede zwischen Licht- und Schallausbreitung, um Größenordnungen höher als bei Visualisierungsproblemen. Die bei VR geforderte Echtzeitfähigkeit (schneller als ca. 1/4 Sekunde) ist daher ohne Vereinfachungen ein fast unlösbares Problem. Neu an dem hier vorgestellten Projekt ist die Verbindung von visueller und akustischer Simulation - und zwar nahezu in Echtzeit! Ermöglicht wurde dies durch die Verwendung eines zwar stark vereinfachten, aber echtzeitfähigen Rechenverfahrens zur Schallfeldberechnung sowie durch ein Auralisierungsgerät, das die gewonnenen Schallfeldgrößen ohne weitere Umrechnung direkt verarbeiten kann.

#### 2. Grundlagen der Auralisation

Die Auralisation setzt zunächst die Berechnung des Schallfeldes eines Raumes voraus, d.h. der zeit- und richtungsabhängigen Energieverteilung. Zielgrößen sind die Raumim-

pulsantworten, nach Einfallrichtungen geordnet. Diese beschreiben die Antwort des Raumes auf einen Impuls, der an einem Quellort, etwa auf der Bühne, abgestrahlt wird, an einem bestimmten Hörerplatz. Sie charakterisieren den Höreindruck vollständig.

Die klassische Methode der geometrischen Raumakustik zur Berechnung des Schallfeldes ist die Spiegelschallquellenmethode: Jede Reflexion wird ersetzt durch („virtuelle“) Spiegelschallquellen, die durch Spiegelung der wahren Schallquelle an Wänden, Decke und Boden entstehen. Diese Methode ist jedoch (bei beliebigen Raumformen) nur für niedrige Reflexionsordnungen effizient oder nur bei quaderförmigen Räumen. Für kompliziertere Raumformen wie z.B. Konzertsäle kann das Schallteilchenverfahren zum Einsatz kommen. Dabei werden von der Schallquelle „Schallteilchen“ nach allen Richtungen ausgesandt, über zahlreiche Wandreflexionen verfolgt und in Detektoren, repräsentativ für die Zuhörer, registriert. Aus dem Zeitpunkt des Eintreffens der Schallteilchen an einem Hörerort und aus ihrer Energie werden die zur Auralisation benötigten Echogramme berechnet. Das auch in Lizenz erhältliche Programm SOPRAN ist im übrigen auch für die Lärmimmissionsprognose in Fabrikhallen geeignet [2,3].

Das Wesentliche an der Auralisation ist die Reproduktion eines richtungstreuen Höreindrucks. Dazu müssen, abhängig von den Einfallrichtungen im Raum, die spezifischen Schallübertragungswege um den menschlichen Kopf herum, die Außenohrübertragungsfunktionen, insbesondere die Zeitverzögerungen, bis zu den Trommelfellen berücksichtigt werden. Dies geschieht durch Faltung der zugehörigen beiden Impulsantworten für jede Richtung mit der vorberechneten Raumimpulsantwort und durch Addition der Faltungsprodukte - eine langwierige Rechenoperation. Zur hörbaren Demonstration werden schließlich die binauralen Raumimpulsantworten noch mit einem „trockenen“, d.h. echofrei aufgenommenen Geräusch gefaltet. Das so gewonnene binaurale Signal wird mit Kopfhörern abgehört.

#### 3. Näherungslösung zur Umsetzung in Echtzeit

Statt der Faltung mit vollständigen Raumimpulsantworten basiert dieser Ansatz auf der vorherigen Berechnung der Nachhallzeit, der sehr schnellen Berechnung nur weniger

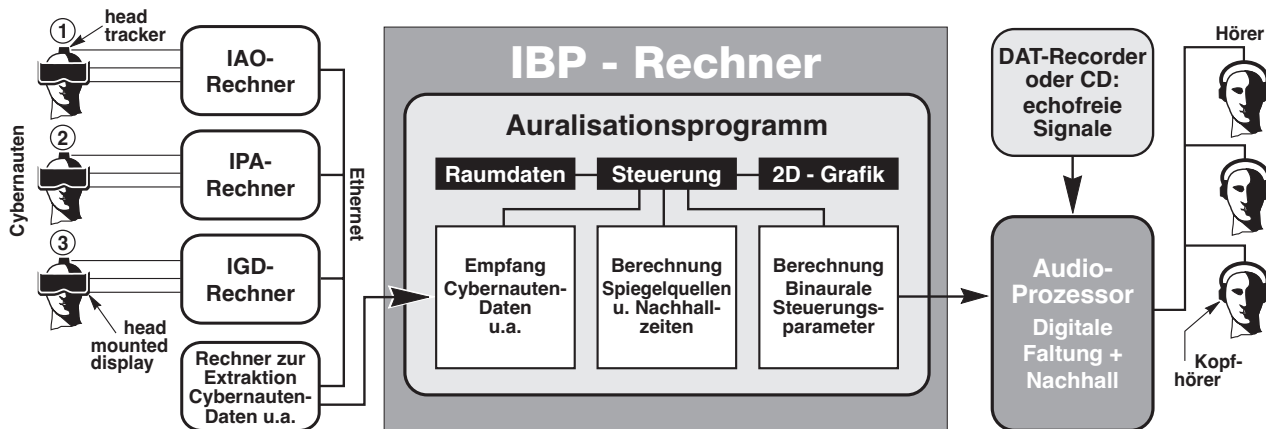


Bild 1: Blockschaftbild zur visuellen und auditiven Virtuellen Realität. Rechner-Vernetzung, Video- und Audio-Geräte

Spiegelquellen und einer Auralisation, bei der der Einfluss des Kopfes zwischen den Ohren stark vereinfacht berücksichtigt wird. Die Faltung findet in einem digitalen Audioprozessor statt [4].

Erfahrungsgemäß genügt es für die Auralisierung, nur die frühen Reflexionen genau nachzubilden. Der Rest kann pauschal als exponentiell abklingender „Nachhallschwanz“ wiedergegeben werden, dessen Nachhallzeit ortsunabhängig ist, und die deshalb einmalig vorweg nach der Sabine'schen Formel aus den konstanten Raumabmessungen und den Absorptionseigenschaften der Wände errechnet wird. Damit ist die Rechenzeit für Echtzeitbetrieb vernachlässigbar klein (einige ms) wobei allerdings die Raumform nur grob berücksichtigt wird.

Der digitale Audioprozessor ermöglicht eine besonders einfache Schnittstelle zum Rechenprogramm der Spiegelschallquellen. Eine Software [4] erlaubt für den Direktschall und die diskret berücksichtigten frühen Reflexionen die direkte Übertragung folgender Schallfeldparameter: relativer Schalldruck und Ankunftszeit, horizontale und vertikale Einfallrichtung relativ zur Blickrichtung des Hörers. Neu an dem Audioprozessor ist, daß er bis zu 130 einzeln definierte Reflexionen in Echtzeit verarbeiten kann. Zur Generierung des Nachhallschwanzes werden Anfangsnachhallzeit EDT, Nachhallzeit T60, Schwerpunktzeit und Gesamtschallpegel übertragen. Es können auch zwei reale Schallquellen an verschiedenen Orten im Raum mit unterschiedlichen Geräuschen auralisiert werden. Um auch akustische Details möglichst naturgetreu wiedergeben zu können, werden elektrostatische Kopfhörer eingesetzt. Die Steuerung des Auralisierungsgeräts erfolgt durch einen PC über eine serielle Schnittstelle. Die Übertragung der Schallfelddaten dauert je nach Anzahl der diskret berücksichtigten Schallquellen zwischen 0,2 und 1 Sekunde.

Visuelle und akustische Virtuelle Realität schließlich wird möglich durch Kopplung der jeweiligen Rechner (Bild 1). Diese erfolgt über eine Netzwerk-Schnittstelle, die laufend Informationen über den Ort und die Blickrichtung von bis zu drei Cybernauten in drei verschiedenen virtuellen Räumen übermittelt. Für wahlweise einen Cybernauten wird dessen Umgebung auralisiert.

#### 4. Anwendungen und Ausblick

Mit der Simulation und Auralisation von Schallfeldern werden neue Planungsinstrumente für zahlreiche Anwendungen zur Verfügung stehen. Es läßt sich demonstrieren, wie z.B. dieselbe Musikdarbietung in verschiedenen Entwürfen eines Raumes oder an unterschiedlichen Plätzen klingt, oder welchen Eindruck der Lärm am zukünftigen Arbeitsplatz hervorrufen wird. Wirkungen grober Fehler, wie Echos [5], zu viel oder zu wenig Nachhall, lassen sich, wenn auch vorerst nur für einfache Rechteckräume, in Echtzeit, d.h. mit sofortiger Reaktion auf Änderungen des Benutzers, erkennen. Die Berechnung von Feinheiten mit dem Schallteilchenverfahren erfordert allerdings noch lange Vorberechnungszeiten. Die weitere Reduzierung der Rechenzeiten ist eine Herausforderung für die Zukunft. Durch die Verkopplung mit einer visuellen Raumdarstellung eignen sich die Demonstrationen nicht nur für Forschung und Lehre, sondern vor allem auch für Architekten und Bauverantwortliche. Das läßt sich im neu eröffneten Demonstrationszentrum des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik vorführen.

#### Literatur

- [1] Stephenson, U.M.: Raumakustische Simulation und Auralisation - Methoden und Anwendungen. In: IPA/IAO-Forum Virtual Reality '94 - Anwendungen und Trends, Hrsg. Bullinger, H.-J., Warnecke, H.J., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Band T42 (1994), S.183-212.
- [2] Stephenson, U.M.: Vom Konzertsaal bis zur Fabrikhalle - das raumakustische Simulationsprogramm SOPRAN. TAB-Technik am Bau 25 (1994), H. 2, S. 25-27
- [3] Stephenson, U.M.: Leistungsfähigkeit und Genauigkeit eines um Streueffekte ergänzten Schallteilchen-Simulationsverfahrens zur Schallpegelprognose in Werkhallen. VDI-Bericht 860 „Schallausbreitung in Werkhallen“, VDI-Verlag Düsseldorf (1990)
- [4] Rindel, J.H.; Lyngø, C.; Naylor, G.: The Use of a Digital Audio Mainframe for Room Acoustical Auralization. Preprint of the Audio Engineering Society, New York (1994), 96th AES Convention Amsterdam (1994)
- [5] Stephenson, U.M.: Zur Raumakustik großer kreisförmiger Räume am Beispiel des Plenarsaals des Deutschen Bundestages. DBZ (1994), H. 5, S.113-124.



Fraunhofer  
Institut  
Bauphysik

### FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK (IBP)

Leiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis  
D-70569 Stuttgart, Nobelstr. 12 (Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart), Tel. 07 11/9 70-00  
D-83626 Valley, Fraunhoferstr. 10 (Postfach 11 52, 83601 Holzkirchen), Tel. 0 80 24/6 43-0