

# Konzeption und Aufbau eines Hörlabors mit einem Wellenfeldsynthesesystem

Dipl.-Ing. Siegbert Versümer<sup>1</sup>, Prof. Dr.-Ing. Dieter Leckschat<sup>2</sup>, Benjamin Meyenberg B.Eng.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fachhochschule Düsseldorf, 40474 Düsseldorf, E-Mail: siegbert.versuemer@fh-duesseldorf.de

<sup>2</sup> Fachhochschule Düsseldorf, 40474 Düsseldorf, E-Mail: dieter.leckschat@fh-duesseldorf.de

<sup>3</sup> 45128 Essen, E-Mail: info@meyenbergaudio.de

## Einleitung

Zur Wiedergabe von Audiomaterial existiert eine Vielfalt von lautsprechergestützten Systemen. Als am meisten verbreitet können die Stereo- und die 5.1-Surroundwiedergabe angesehen werden. Beide weisen jedoch nur eine minimale Hörzone [1] auf, weshalb die akustische Darbietung zeitgleich nur einem Hörer optimal zugänglich sein kann. Abhilfe kann hier der objektorientierte Ansatz der akustischen Wellenfeldsynthese (WFS) schaffen. Hierzu werden zu einzelnen Audiosignalen entsprechend deren Positionsinformationen in einem virtuellen Raum für ein horizontales Array von Lautsprechern die einzelnen Signale so berechnet, dass die Überlagerung der Schallwellen aller aktiven Lautsprecher dem Wellenfeld der virtuellen Quelle gleicht. Dies gelingt in gewissen Grenzen in der gesamten, von den Lautsprecherzeilen eingeschlossenen Hörzone.

Aufgrund der hierfür notwendigen großen Anzahl an Lautsprechern erscheinen solche WFS-Systeme schnell unwirtschaftlich. Ziel des vorliegenden Projektes ist es daher, mittels preisgünstiger Komponenten aus dem Pro-Audiobereich und eigens entwickelter Software und Verstärker kostenminimiert dennoch ein echtes WFS – Render-/Wiedergabesystem mit 120 diskreten Kanälen in einem hierfür akustisch optimierten Raum, einem Hörstudio, im Rahmen von studentischen Projekten und Abschlussarbeiten aufzubauen.

Das so entstandene System soll zum einen für Musikproduktionen, die in den Studiengängen der FH D angefertigt werden, Anwendung finden. Andererseits werden Ziele in Richtung weiterer Forschung verfolgt, etwa die Einbeziehung der dritten Raumdimension.

## Audiobearbeitung und WFS-Rendering

Das WFS-System beinhaltet einen Audio-Zuspielrechner, auf dem mit Nuendo die Audiosignale wie für Toningenieure üblich bearbeitet werden können, und einem WFS-Renderingrechner, der für jede virtuelle Audioquelle mittels Positionsdaten der Quellen, welche per MIDI mit 14-Bit Auflösung zum Renderingrechner übertragen werden, Position und Ausrichtung der Lautsprecher und der Abmaße des virtuellen Raumes die einzelnen Lautsprechersignale in Echtzeit berechnet.

### Audiobearbeitung mit Nuendo

In dem Sequenzer Nuendo können die einzelnen Audiosignale der Quellen in mehreren Spuren auf einer Zeitachse zueinander positioniert, mit Effekten im Klang verändert und in frei wählbarer Intensität an den Renderingrechner über ADAT-MADI-Converter gesendet werden. Durch den Surround-Panner, dessen quadratisches Feld auf den virtuellen

Raum gemappt wird, werden die Positionen der virtuellen Quellen festgelegt. Ein *Generischer Midi-Controller* kodiert diese Positions-Koordinaten mit je zwei 7-Bit Control Changes.

### WFS-Algorithmus

Die Software zur Berechnung der einzelnen Lautsprechersignale ist im Rahmen einer Diplomarbeit [2] entstanden und basiert auf der C++ - Bibliothek „juce“ [3]. Diese bietet plattformübergreifend und somit betriebssystemunabhängig Zugriff auf sämtliche Audiotreiber, unterstützt das MIDI-Protokoll, graphische Benutzeroberflächen und, für das Abspeichern von Lautsprecher- und Projektdaten, XML-Dateizugriff.

Die 120 Lautsprechersignale werden in Echtzeit mittels einer vereinfachten Version des Syntheseoperators nach Verheijen [4] berechnet. Hierbei werden derzeit nur die Direktschallanteile berücksichtigt. Für eine bessere räumliche Tiefenstaffelung werden von Nuendo per Faltung mehrere Hallsignale erzeugt, welche über die vier Lautsprecherzeilen entlang des Raumes wiedergegeben werden.

Für bewegte Quellen ist es nötig, das Audiomaterial leicht schneller oder langsamer wiederzugeben, wenn sich die virtuelle Quelle auf die Hörzone zu oder von ihr fort bewegt (Dopplereffekt). Hierzu müssen Sample-Zwischenwerte errechnet werden, um akustische Artefakte zu vermeiden. Für diesen Zweck hat sich eine lineare Interpolation als notwendig und ausreichend erwiesen. Eine geringfügige Verbesserung der Audioqualität auf Kosten von erhöhtem Ressourcenverbrauch kann durch eine Interpolation mit kubischen Spline-Funktionen erreicht werden.

### Performance

Mit einer i7-CPU mit 4 GHz lassen sich derzeit 13 simultan schnell bewegte Punktquellen rendern. Bei der Wiedergabe von stehenden Punktquellen limitiert momentan noch das Audiointerface des Zuspielrechners mit drei ADAT-Verbindungen die Anzahl auf 24 Quellen, mit deren Berechnung der Rendering-PC dann nicht ausgelastet ist. Da die Audioberechnung derzeit nur in einem einzigen Thread stattfindet, welcher auf nur einem Kern der CPU läuft, ist noch ein deutlicher Performancegewinn zu erwarten, wenn zukünftig die Audioroutinen auf mehrere Threads aufgeteilt werden.

### Technik

Neben den beiden Computern zur Audiobearbeitung und zum WFS-Rendering mit drei ADAT- bzw. zwei MADI-Schnittstellen dienen zwei ADAT-MADI-Converter, 16 ADAT-DACs, acht Verstärker à 16 Kanäle und 120 Lautsprecher der Realisierung der Schallfeldsynthese.

### Verstärker

Um bei 120 gleichzeitig aktiven Lautsprechern einen noch annehmbaren Grundgeräuschpegel zu gewährleisten, kommen zweikanalige Verstärkermodule mit digitaler Endstufe zum Einsatz (Class-D). Der Ruheschalldruckpegel in einem Abstand von  $d = 1$  cm zum Hochtöner eines Lautsprechers beträgt lediglich  $L_R = 34$  dB<sub>SPL(A)</sub>. So dominiert bei einer Entfernung von ca. 1 m deutlich das Grundgeräusch des Raumes und die Lautsprecher im Ruhezustand werden unhörbar.

Ein Wirkungsgrad von  $\eta_{amp} = 85$  % der Wandler bei Volllast und zwei Schaltnetzteile mit einem Wirkungsgrad von bis zu  $\eta_{supply} \leq 93$  % führen zu einer Verlustleistung von  $P_{16Ch} = 50$  W für acht Verstärkermodule und tragen dazu bei, dass das gesamte WFS-System mit einer Gesamtverlustleistung von nur  $P_{ges} = 1000$  W an einer einzigen 230-V-Phase betrieben werden kann.

### Lautsprecher

Verwendung finden 120 Zweiwegelautsprecher des unteren Preissegmentes mit jeweils einem 5½" Tieftöner und einem ½" Hochtöner. Sie wurden aufgrund messtechnischer Ergebnisse und auch subjektiver Hörvergleiche gegenüber anderen, auch deutlich teureren Lautsprechern, vorgezogen. Ihre Gehäusebreite führt bei senkrechter Aufstellung zu einem Abstand zwischen den akustischen Zentren zweier benachbarter Lautsprecher von  $\Delta x = 150$  mm. Dies entspricht einer örtlichen Diskretisierung (vgl. zeitliche Abtastung), die bei einer Schallgeschwindigkeit  $c = 343$  m/s und einem homogenen, maximalen Abstrahlwinkel zwischen der Ausbreitungsrichtung der Schallwelle der virtuellen Quelle und der Lautsprechernormalen von  $\rho = \pm 45^\circ$  eine obere Grenzfrequenz  $f_{max} \approx 1600$  Hz gemäß der Formel (1) zur Folge hat.

$$f_{max} = c / (2 \Delta x \sin \rho) \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

Auch wenn die Empfindlichkeit der Tieftöner bereits unterhalb von ca. 120 Hz abnimmt (Abbildung 1), ist eine ausreichende Basswiedergabe möglich, wenn für tiefe Frequenzen mehrere Lautsprecher gemeinsam angesteuert werden. So kann bei 30 gleichzeitig aktiven Lautsprechern noch bei 63 Hz ein hoher Schalldruckpegel von 100 dB<sub>SPL</sub> in der Raummitte erreicht werden. Dies ist ausreichend, um z.B. einer Bassdrum genügend Kraft zu verleihen. Die Gesamtfläche der Tieftönermembranen entspricht sechs 15-Zoll-Lautsprechern.

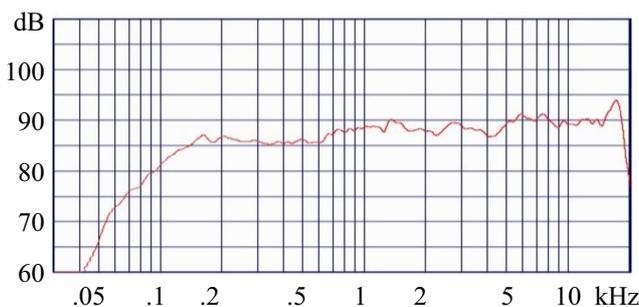


Abbildung 1: Amplitudenfrequenzgang der Lautsprecher.

### Hörstudio

Für das WFS-Setup wurde ein Lagerraum mit Betonwänden akustisch vermessen und dessen Raumakustik optimiert [5]. Hierzu dienen Plattenschwinger und Helmholzresonatoren zur Dämpfung der Moden in unteren Frequenzbereich. Breitbandabsorber an den seitlichen Wänden und ein Moltonvorhang vor dem rückwärtigen Regal, in welchem die Technik verstaut ist, regulieren die mittleren und hohen Frequenzen. Die Abb. 2 zeigt die gemessene Nachhallzeit über der Frequenz mit einem sehr homogenen Verlauf ab 200 Hz für das Hörstudio im Endzustand mit geschlossenen Vorhängen. Die zu tiefen Frequenzen deutlich zunehmende Nachhallzeit ist positiv zu bewerten, da sie die Lautsprecher, deren Empfindlichkeit unterhalb von 120 Hz abnimmt, unterstützt.

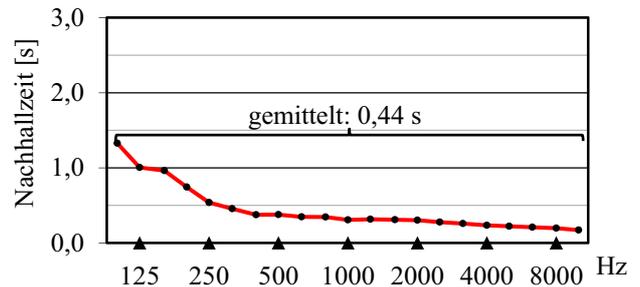


Abbildung 2: Gemessene Nachhallzeit des Hörstudios in Terzbändern.



Abbildung 3: WFS-Hörstudio mit Arbeitsplatz, Lautsprecherarray (schwarz) und Breitbandabsorbern (blau).

### Literatur

- [1] De Vries, D., *Waves Field Synthesis*. New York: Audio Engineering Society Inc., 2009. 9780937803684.
- [2] Valkenburg, I., *Erstellung einer Software für die akustische Wellenfeldsynthese in der Programmiersprache C++*. Fachhochschule Düsseldorf, 2011.
- [3] C++ - Bibliothek Juce, URL: <http://www.rawmaterialsoftware.com>
- [4] Verheijen, E., *Sound reproduction by Wave Field Synthesis*. Delft: Delft University of Technology, 1998.
- [5] Meyenberg, B., *Raumakustische Konzeption und Realisation eines Abhörzimmers und Aufbau eines Klangsystems zur Wiedergabe der akustischen Wellenfeldsynthese*. Fachhochschule Düsseldorf, 2010.