

# Wellenfeldsynthese für einen großen Hörsaal

Christoph Moldrzyk<sup>1</sup>, Anselm Goertz<sup>2</sup>, Michael Makarski<sup>3</sup>, Stefan Feistel<sup>4</sup>, Wolfgang Ahnert<sup>5</sup>, Stefan Weinzierl<sup>6</sup>

<sup>1</sup> VISAURAL Berlin; [aural@prz.tu-berlin.de](mailto:aural@prz.tu-berlin.de)

<sup>2</sup> Audio & Acoustics Consulting Aachen; [anselm.goertz@t-online.de](mailto:anselm.goertz@t-online.de)

<sup>3</sup> Audio & Acoustics Consulting Aachen; [mckarski@web.de](mailto:mckarski@web.de)

<sup>4</sup> SDA Software Design Ahnert GmbH, Berlin; [sfeistel@sda.de](mailto:sfeistel@sda.de)

<sup>5</sup> ADA Acoustic Design Ahnert, Berlin; [wahnert@ada-acousticdesign.de](mailto:wahnert@ada-acousticdesign.de)

<sup>6</sup> TU-Berlin, Fachgebiet Audiokommunikation; [stefan.weinzierl@tu-berlin.de](mailto:stefan.weinzierl@tu-berlin.de)

## Einleitung

Ein großer Hörsaal der TU Berlin mit einem Raumvolumen von ca. 3.200 m<sup>3</sup> und 644 Sitzplätzen wurde im Rahmen einer medientechnisch anspruchsvollen Neuausstattung mit einer Anlage zur Wellenfeldsynthese ausgerüstet. Ziel war die Schaffung einer universell einsetzbaren Beschallungsanlage, die von einer erweiterten Hörsaalbeschallung über die Emulation verschiedener, mehrkanaliger Wiedergabeverfahren durch virtuelle Lautsprecher bis zur Präsentation von audiovisueller Medienkunst und Wahrnehmungsexperimenten in virtuellen Umgebungen in Kombination mit stereoskopischer 3D-Projektion eine Vielzahl von Nutzungsmöglichkeiten bietet.

## Hardware

Im Hinblick auf die vielseitige Nutzung des Systems war die akustische Ausgestaltung des Saals als Kompromiss zwischen einer klassischen Hörsaal-Akustik mit sprachoptimiertem Nachhall und einer für die Schallfeldsynthese günstigen Akustik ausgelegt, welche insbesondere frühe Reflexionen aus der Richtung der Lautsprecher unterdrückt. Dabei wurde die Nachhallzeit auf Werte um 1 s gesenkt [1].

Um eine annähernd konstante Höhe der Lautsprecher über den Sitzplätzen zu gewährleisten, musste das umlaufende Lautsprecherband mit einer Länge von etwa 86 m in die vom Architekten vorgesehene Wandstruktur wie auch die im Sitzblock auftretende Wandsteigung angepasst werden (Abb. 1). Für das Array wurde ein achtkanaliges, DSP-gesteuertes und mit FIR-Filtern linearphasig entzerrtes Lautsprechermodul mit je 2 Tieftönern und 24 Mittelhoctönern entwickelt. Es weist eine breite horizontale Abstrahlung und einen engen vertikalen Öffnungswinkel zur Unterdrückung von Decken- und Bodenreflexionen auf (Abb. 2)[2]. Aus dem Lautsprecherabstand der Mittelhoctöner von 10 cm resultiert eine Gesamtanzahl von 832 Kanälen. Durch den ungewöhnlich niedrigen Lautsprecherabstand tritt ein spatial aliasing für frontale ebene Wellen erst bei Frequenzen oberhalb von 3440 Hz auf [3].

## Netzwerk

Die Signalaufbereitung für die Lautsprecher erfolgt über ein Linux-Cluster mit 15 Einzelknoten und zwei Kontrollrechnern. Von dort werden Audiosignale über MADI-LWL und MADI/ADAT-Konverter in der Nähe der einzelnen, achtkanaligen Lautsprechermodule auf die insgesamt 832 Kanäle des Arrays geführt. Zusätzlich sind alle Komponenten über breitbandiges Ethernet vernetzt und erlauben eine bidirektionale Kommunikation, was insbesondere für Updates, Veränderungen in der Lautsprecherentzerrung (auch in Echtzeit) und zur Zustandskontrolle notwendig ist.

## Software

Für die Schallfeldsynthese wurde die an der TU Berlin entwickelte, unter GPL Lizenz veröffentlichte Software sWONDER [4] für den Betrieb auf einem Rechnercluster erweitert und in einzelne Softwaremodule für die graphische Benutzeroberfläche, einen score player/recorder, eine Kontrolleinheit, sowie einzelne online und offline rendering units getrennt. Die Module kommunizieren über das OSC-Protokoll zur Definition von dynamischen, zeitlich/räumlichen Szenen [5].

## Simulationen

Zur Prognose der durch das System erreichbaren Schallpegelverteilung im Raum wurde, auf der Grundlage der durch eine Messung im reflexionsarmen Halbraum bestimmten Richtcharakteristik (s. Balloon-Darstellung, Abb. 2) und der für sechs lokale Raumzonen individuell konfigurierten Entzerrung der Lautsprechermodule [2], eine Freifeld-Simulation mit der neuen, nun um die Möglichkeit der direkten Berechnung individueller Lautsprecherfilter durch einen WFS-Operator erweiterten Simulations-Software EASE 4.2 [6] berechnet. Die Simulationen zeigen eine gute Übereinstimmung der simulierten Schallfelder von Primärquelle (virtuelle Schallquelle) und Sekundärquellen (LS-Array).

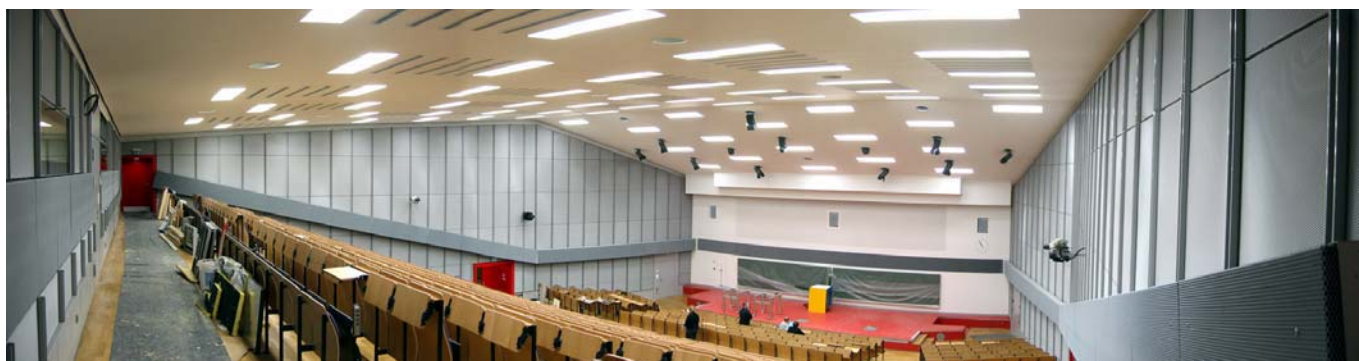
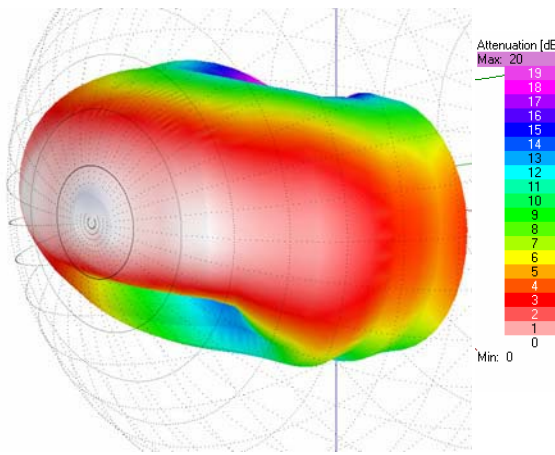
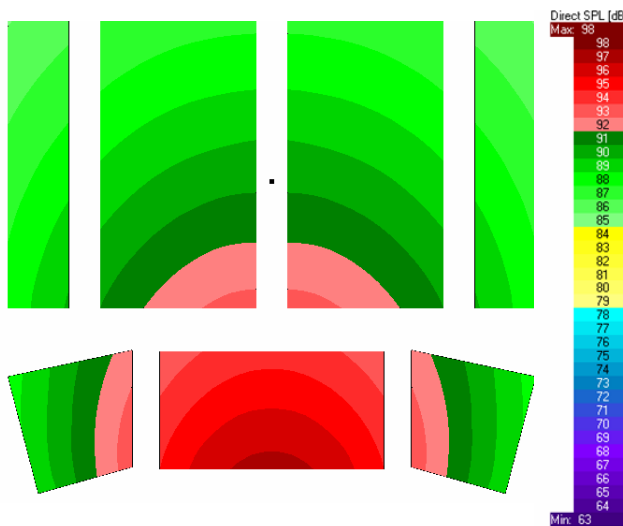


Abbildung 1 Hörsaal H 104 der TU Berlin mit umlaufendem Lautsprecherarray in der Bauphase



**Abbildung 2** Balloon-Daten (Messwerte) zum Abstrahlverhalten eines Lautsprechermoduls und zur Verwendung in der raumakustischen Simulation

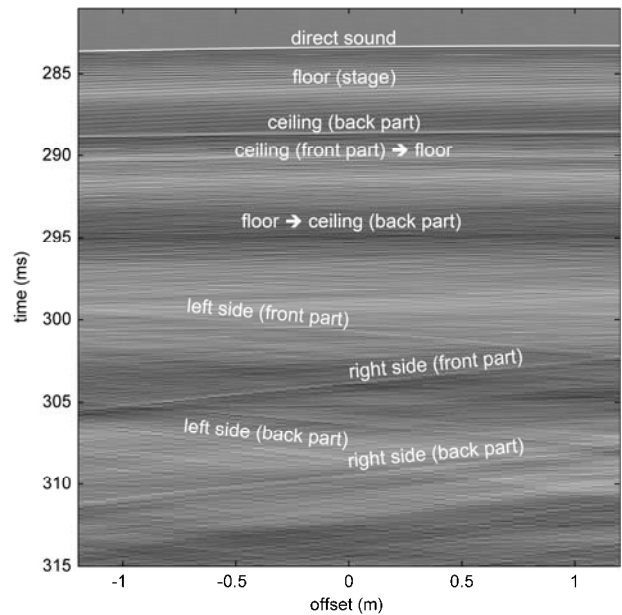
Gleichzeitig lässt sich der erreichbare Direktschallpegel im Raum auf Grundlage eines Maximalpegels der einzelnen Module von 102 dB in 1 m Entfernung, der Richtcharakteristik der Lautsprecher und der für die WFS-Synthese erforderlichen Einzelsignale der Lautsprecher berechnen (Abb. 3).



**Abbildung 3** Simulation einer Punktschallquelle 4 m hinter dem frontalen LS-Array durch die Lautsprechersignale des WFS-Systems

## Messungen

Zur Überprüfung der korrekten Funktionalität von Hardware, Software und Netzwerk wurden durch ein Team der TU Delft Impulsantworten von verschiedenen durch das System synthetisierten, virtuellen Quellen an mehreren Empfängerorten im Saal aufgenommen. Auf diese Weise konnte insbesondere der Einfluss von Raumreflexionen untersucht werden, welche aufgrund des raumakustischen Anforderungsprofils naturgemäß nicht völlig unterdrückt werden. Abb. 4 zeigt das Schallfeld einer mittigen, frontalen Punktschallquelle, gemessen mit einem Mikrofonarray im hinteren Teil des Saales über einen Zeitbereich, der alle Reflexionen erster Ordnung umfasst. Eine Auswertung der Pegelverhältnisse ergab selbst im kritischen, hinteren Teil des Raums eine Unterdrückung früher Reflexionen um mehr als 6 dB, sodass angesichts von Erfahrungen mit anderen WFS-Systemen der Einfluss der Raumakustik als unkritisch anzusehen ist.



**Abbildung 4** Schallfeld einer mittigen, frontalen Punktschallquelle in Orts-Zeit-Darstellung, gemessen durch ein Mikrofonarray im hinteren Teil des Saales (Abb.: TU Delft/Diemer de Vries)

## Fazit

Die Wellenfeldsynthese wird bisher überwiegend als Wiedergabeverfahren im Kino, in der virtuellen Akustik und vereinzelt in der Beschallungstechnik eingesetzt. Nun wurde an der TU Berlin erstmals ein großer Hörsaal mit dieser Technologie ausgestattet. Durch den Einsatz eines neu entwickelten, DSP-gesteuerten Lautsprechermoduls und einer unter Open-Source-Lizenz entwickelten Software wurde die weltweit größte WFS-Installation zu maßvollen Kosten pro Kanal realisiert und gleichzeitig dem universitären Gedanken einer auch für eine globale Entwicklergemeinschaft offenen System-Plattform für Forschung und Entwicklung Rechnung getragen. Für die Produktion und Präsentation innovativer Inhalte wird insbesondere die Verbindung mit einer leistungsfähigen 3D-Projektionstechnik und die Anbindung an die Zentren für Medienkunst und Medientechnologie vor Ort gute Voraussetzungen bieten.

## Literaturhinweise

- [1] Behrens T, Ahnert W, Moldrzyk C (2007) Raumakustische Konzeption von Wiedergaberäumen für Wellenfeldsynthese am Beispiel eines Hörsaals der TU Berlin. Fortschritte der Akustik, DAGA Stuttgart
- [2] Goertz A, Makarski M, Moldrzyk C, Weinzierl S (2007) Entwicklung eines achtkanaligen Lautsprechermoduls für die Wellenfeldsynthese. Fortschritte der Akustik, DAGA Stuttgart
- [3] Leckschat D, Baumgartner M (2005) Wellenfeldsynthese: Untersuchungen zu Alias-Artefakten im Ortsfrequenzbereich und Realisierung eines praxistauglichen WFS-Systems. Fortschritte der Akustik, DAGA München
- [4] <http://swonder.sourceforge.net>
- [5] Baalman MAJ, Hohn T, Schampijer S, Koch T (2007) Renewed architecture of the sWONDER software for Wave Field Synthesis on large scale systems. 5th International Linux Audio Conference, Berlin
- [6] <http://www.afmg.eu>