

# **Zur Entwicklung von Lautsprechern für die Wellenfeldsynthese**

***(Development of loudspeakers  
for wave field synthesis systems)***

*Michael Makarski \*, Anselm Goertz \*\**

*Stefan Weinzierl \*\*\*, Christoph Moldrzyk \*\*\*\**

\* IFAA (Institut für Akustik und Audiotechnik) Aachen, [michael.makarski@ifaa-akustik.de](mailto:michael.makarski@ifaa-akustik.de)

\*\* TU Berlin (Fachgebiet Audiokommunikation) und IFAA, [anselm.goertz@ifaa-akustik.de](mailto:anselm.goertz@ifaa-akustik.de)

\*\*\* TU Berlin (Fachgebiet Audiokommunikation), [stefan.weinzierl@tu-berlin.de](mailto:stefan.weinzierl@tu-berlin.de)

\*\*\*\* VISAURAL Berlin, [aural@prz.tu-berlin.de](mailto:aural@prz.tu-berlin.de)

## **Kurzfassung**

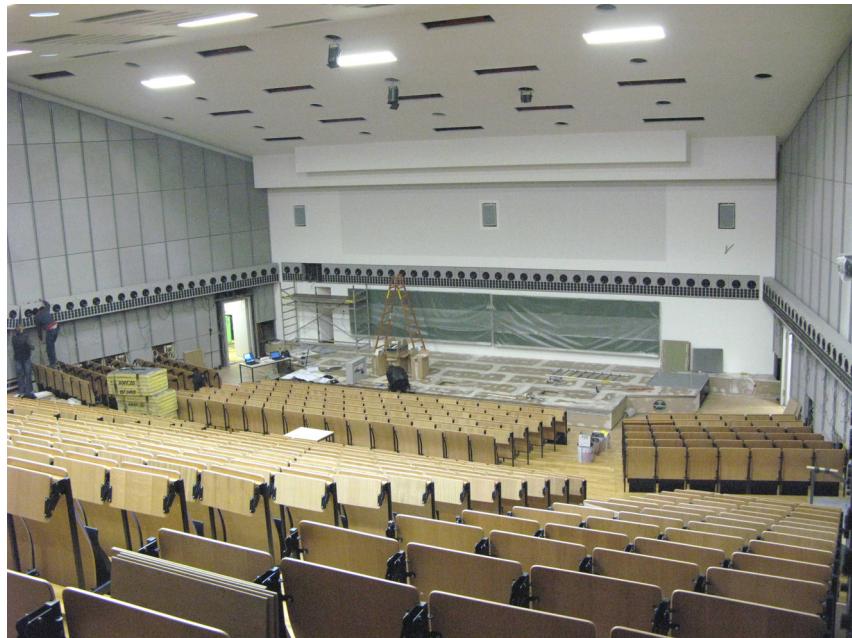
Die Wellenfeldsynthese stellt erhöhte Anforderungen an die dort eingesetzten Lautsprecher. Zur Verringerung von Aliasing-Artefakten sollte der Abstand der Kanäle zueinander so gering wie möglich sein, womit sich der Einsatz größerer Lautsprecher oder Hörner weitgehend ausschließt. Auf der anderen Seite wir aber speziell für Kino-Installationen ein hoher Maximalschalldruck zur Erfüllung bestimmter Vorgaben gefordert. In diesem Beitrag werden Verfahren mit Hilfe moderner FEM-Hornberechnungen und Simulationen zur sicheren Vorhersage der Lautsprechereigenschaften vorgestellt, mit deren Hilfe innerhalb kurzer Zeit exakt auf die Bedürfnisse der Anwendung optimierte Lautsprecher konstruiert werden können.

## **1. Einleitung**

Die professionelle Entwicklung von Lautsprecheranlagen kann mit numerischen Methoden mit sehr hoher Vorhersagegenauigkeit des Ergebnisses komplett am PC durchgeführt werden. Dabei greifen numerische Abstrahlungsberechnungen, CAD-Daten der Gehäuse und Schallführungen (Hörner), Vierpoldaten der Komponenten, TS-Parameter sowie Tools zur Berechnung der Abstrahlung von Mehrwegesystemen inklusive der Frequenzweichenfunktionen nahtlos ineinander über. Am Beispiel der kostenoptimierten Wellenfeldboxen für den H104 an der TU Berlin und Konzepten zur Weiterentwicklung eines Nachfolgelautsprechers wird das Verfahren anhand von Berechnungs- und Messergebnissen erläutert.

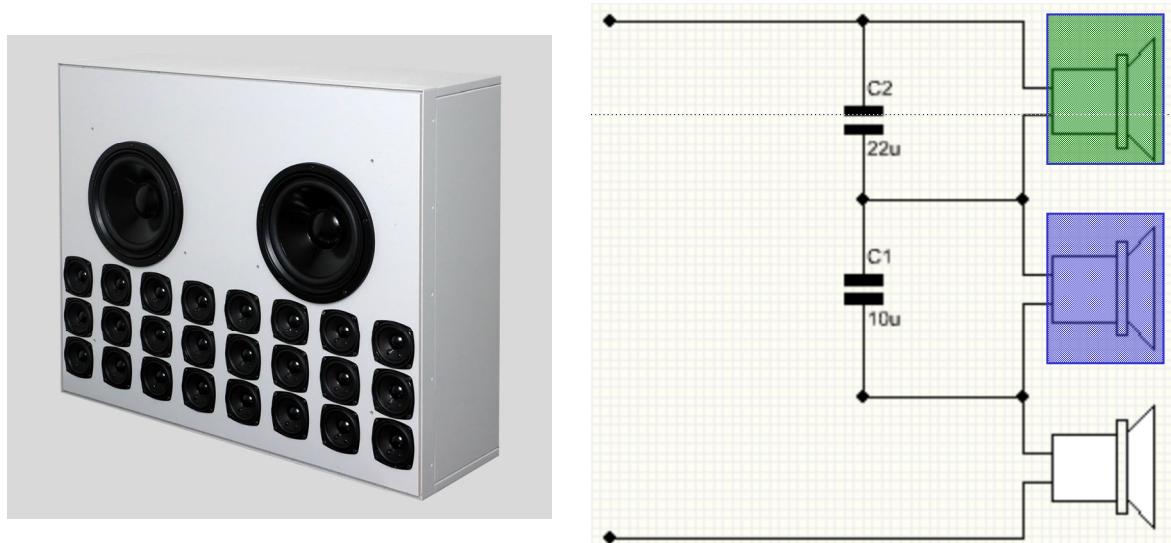
## **2. Der Lautsprecher für den H104 an der TU Berlin**

Bei der Realisierung des Lautsprechers für die Wellenfeldsyntheseanlage in Berlin mussten zum einen die typischen Anforderungen des Verfahrens der Wellenfeldsynthese (WFS) berücksichtigt werden, aber gleichzeitig auch das Abstrahlverhalten an die Aufhängeposition und die Raumakustik angepasst werden.



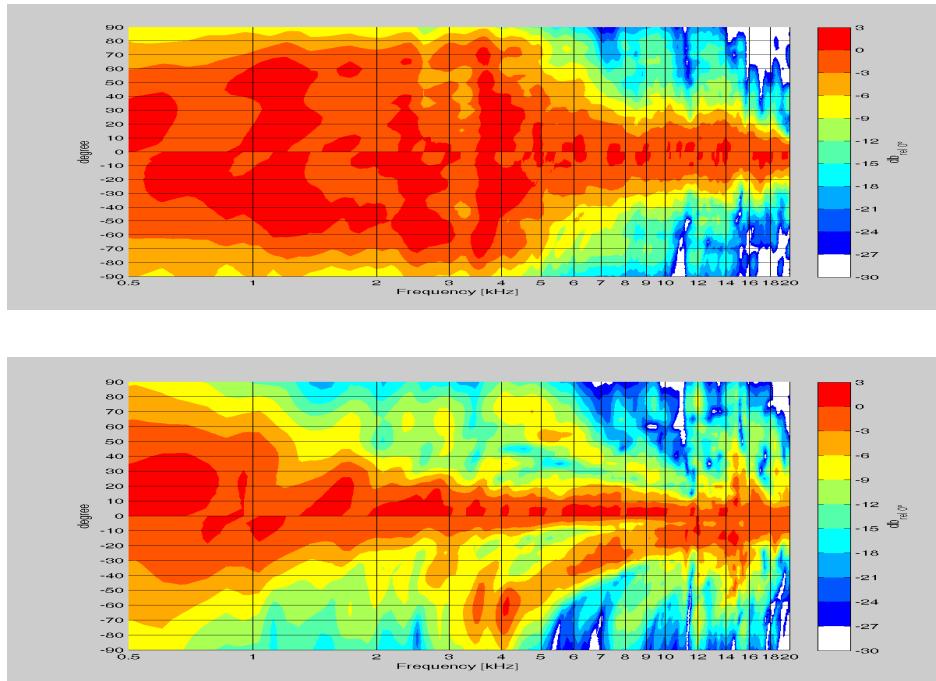
*Abb. 1:* Der Hörsaal H104 während der Installation der Lautsprecher. Gut zu erkennen ist die eigentlich nicht optimale zu hohe Montageposition der Lautsprecher.

Der Lautsprecher wurde mit einem für WFS sehr geringen Kanalabstand von nur 10 cm umgesetzt, wobei die vertikale Directivity möglichst eng und leicht nach unten gerichtet sein sollte. In der Horizontalen war hingegen eine möglichst breite Abstrahlung erwünscht.



*Abb. 2:* links: Der Lautsprecher für den H104. rechts: kostenoptimierte passive Frequenzweiche für die drei Breitbandchassis eines Kanals

Die geforderte enge vertikale Bündelung wurde mit einer Zeilenanordnung von drei Breitbandchassis realisiert. *Abb. 3* zeigt das für diese Konfiguration gemessene horizontale und vertikale Abstrahlverhalten.



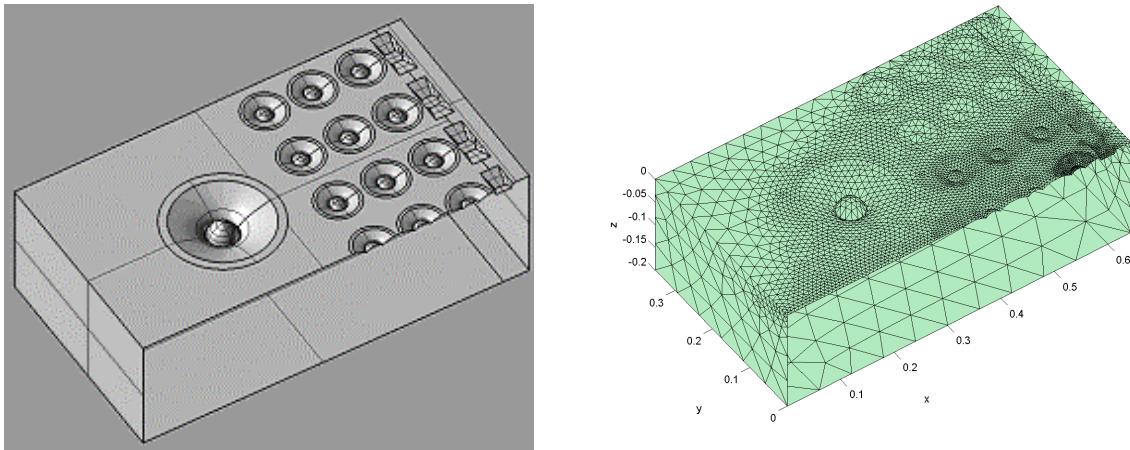
*Abb. 3:* Horizontales (oben) und vertikales Abstrahlverhalten (unten) der Lautsprecher aus dem H104.

### 3. Weiterentwicklung der WFS-Lautsprecher

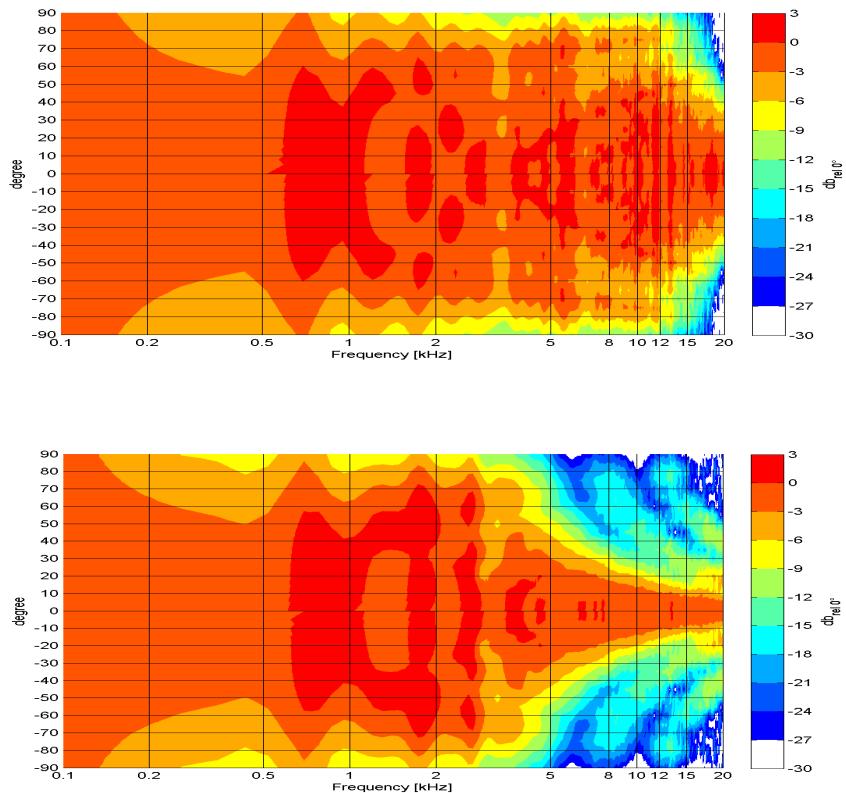
Für die nächste Generation der WFS-Lautsprecher wurden zunächst verschiedene Konzepte mit Hilfe moderner Simulationsverfahren untersucht. Ziel in der Entwicklung ist es die horizontale Strahlbreite im Bereich jenseits von 5 kHz zu vergrößern, die Vertikale gleichmäßiger zu gestalten, sowie einen höheren Maximalschalldruck zu erreichen.

Die Vorgehensweise bei der PC-gestützten Entwicklung kompletter Lautsprecher gliedert sich in drei Schritte. Im ersten Schritt wird ein 3D-Modell im CAD erstellt. Dabei werden nur die für die Abstrahlung relevanten Flächen dargestellt. Im zweiten Schritt erfolgt mit der BEM (Boundary Element Method) eine Abstrahlungsberechnung von der Geometrie für alle im Simulationsmodell definierten Quellen. Im letzten Schritt wird das Gesamtabstrahlverhalten der Anordnung durch Superposition der gefilterten Einzelwege berechnet.

Das in *Abb. 4* gezeigte Konzeptmodell entspricht weitestgehend dem ursprünglichen Lautsprecher im H104, wurde jedoch durch einen Horntreiber mit Miniaturhorn ergänzt. Die Horngeometrie ist hier so ausgelegt, dass eine deutlich größere Strahlbreite im Hochtonbereich erreicht wird und gleichzeitig erheblich höhere Maximalpegel erzielt werden können.

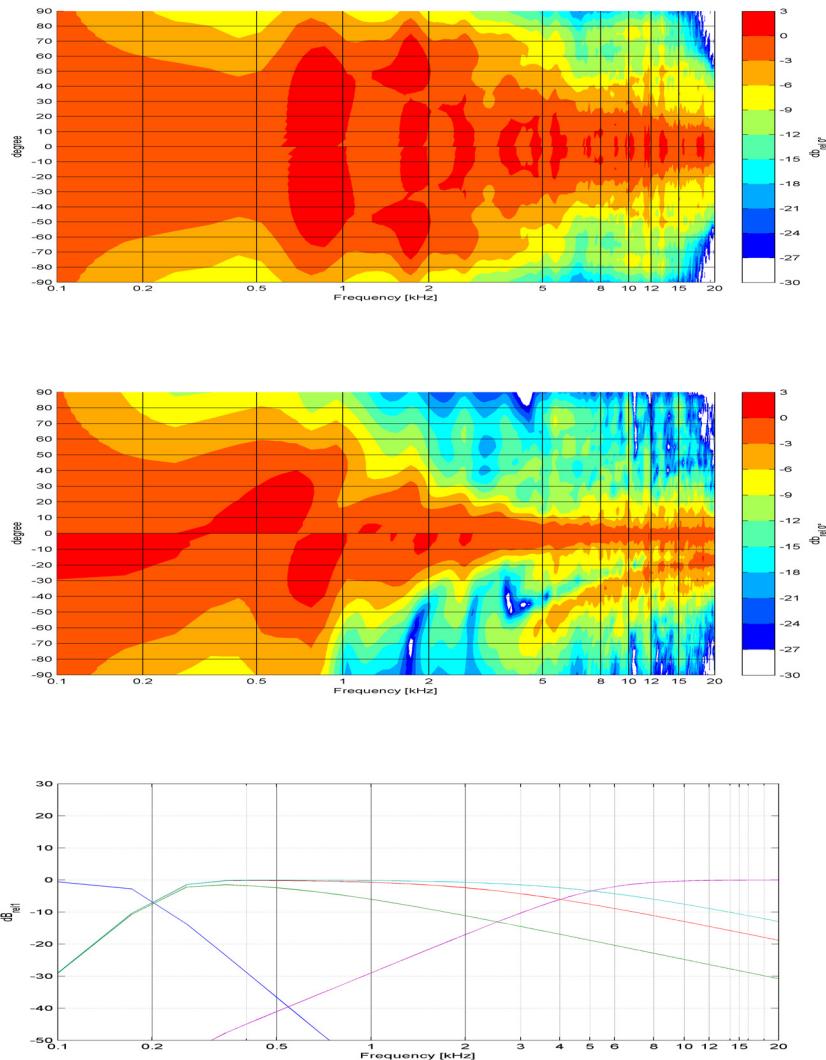


*Abb. 4:* Konzeptmodell (links) und das zugehörige in der Oberfläche als Dreiecks-Mesh diskretisierte Simulationsmodell (rechts)



*Abb. 5:* Simulierte horizontale Directivity eines Hornhochtöner (oben) und eines 3“-Breitbandchassis (unten)

Die für die Einzelwege simulierte Abstrahlung (*Abb. 5*) zeigt deutlich, dass durch das Konzept mit dem Hornhochtöner eine Vergrößerung der horizontalen Strahlbreite erreicht werden kann.



*Abb. 6:* Simulierte horizontale (oben) und vertikale Directivity (Mitte) eines Kanalzu-  
ges. Das zugehörige Filtersetup (unten) hat niedrigere Grenzfrequenzen bei den  
Breitbändern als das im H104 benutzte Setup und die Filterordnung ist hier nur 6 dB  
pro Oktave, statt der 12 dB im H104-Lautsprecher.

Durch die leicht geänderte Filterung und den zusätzlichen Hornhochtöner können die akustischen Eigenschaften des WFS-Lautsprechers in den angepeilten Punkten verbessert werden. Man erreicht mit der in *Abb. 6* simulierten Anordnung zusammen mit einer angepassten Filterung eine um 20° vergrößerte horizontale Strahlbreite bis 12 kHz. In der Vertikalen setzt die Nebenkeule erst bei 5 kHz statt wie bisher bei 3 kHz ein. Weiterhin ist diese zudem geringer im Pegel und belegt auch nicht so einen großen Winkelbereich. Erhöhte Pegelanforderungen können mit einem Horntreiber einschließlich Horn auch problemloser als mit einem Breitbandchassis umgesetzt werden.

#### 4. Zusammenfassung

Das hier gezeigte und untersuchte erweiterte Konzept ist nur eines von mehreren in Frage kommenden. Mit Hilfe moderner Simulationstechniken können solche Konzeptstudien nicht

nur deutlich schneller als durch Messung an realen Prototypen sondern auch kostengünstiger durchgeführt werden. Der Gewinn ist um so größer, je komplexer und vielfältiger die eingesetzten Geometrien sind.

Bei konsequentem Einsatz aller verfügbaren Simulationstechniken ist das Prototyping nur der letzte Schritt in der Entwicklung eines neuen Konzepts und dient lediglich als finale Verifikation der Simulationen.

## **5. Quellenverzeichnis**

- [1] Behrens, T., Ahnert, W., Moldrzyk, C.: „Raumakustische Konzeption von Wiedergaberäumen für Wellenfeldsynthese am Beispiel eines Hörsaals der TU Berlin“  
Fortschritte der Akustik, DAGA Tagungsband 2007
- [2] Moldrzyk, C., Goertz, A., Makarski, M., Feistel, S., Weinzierl, S., Ahnert, W.: „Wellenfeldsynthese für einen großen Hörsaal“  
Fortschritte der Akustik, DAGA Tagungsband 2007
- [3] Goertz, A., Makarski, M., Moldrzyk, C., Weinzierl, S.: „Entwicklung eines achtkanaligen Lautsprechermoduls für die Wellenfeldsynthese“  
Fortschritte der Akustik, DAGA Tagungsband 2007
- [4] Makarski, M.: „Tools for the Professional Development of Horn Loudspeakers“  
Dissertation an der RWTH Aachen 2006