

Wellenfeldsynthese – Erweiterungen und Alternativen

Robert Höldrich, Alois Sontacchi

Institut für Elektronische Musik und Akustik Graz, Inffeldgasse 10/3, 8010 Graz, Österreich

Email: {hoeldrich, sontacchi}@iem.at

Einleitung

Die Wellenfeldsynthese (WFS) hat in den letzten Jahren den Proof-of-Concept als innovatives Beschallungskonzept weitgehend erbracht. Die von herkömmlichen Wiedergabesystemen wie Zwei-Kanal-Stereo oder „5.1“ bekannte Begrenzung des Abhörgebiets und die fehlende akustische Perspektive können mit WFS überzeugend überwunden werden. Allerdings zeigt WFS weiterhin Einschränkungen wie die Notwendigkeit getrennter Quellensignale, fehlerhaftes Abstandsverhalten der virtuellen Quellen, mangelnde Stabilität von fokussierten Quellen, die notwendige Bedämpfung des Wiedergaberaums, ein restriktives Lautsprecher-Layout und die noch immer fehlende dritte Dimension in der Schallwiedergabe.

In der präsentierten Arbeit wird als Erweiterung des WFS-Konzepts der Zeitumkehrspiegel vorgestellt, der eine deutliche Stabilisierung fokussierter Quellen erreicht ohne einer starken Bedämpfung des Wiedergaberaums oder einer speziellen Lautsprecherkonfiguration zu bedürfen. Als Alternative zu WFS und gleichzeitig als flexible Erweiterung in die dritte Dimension wird die Kombination mit Ambisonics-Systemen höherer Ordnung vorgeschlagen, deren hervorragende Praxistauglichkeit in mehreren Großproduktionen zeitgenössischer Musiktheaterwerke gezeigt wurde.

Fokussierte Quellen mit dem Zeitumkehrspiegel

Einer der eindrucksvollsten Vorzüge der Wellenfeldsynthese ist deren Fähigkeit virtuelle Quellen vor dem Lautsprecher-Array zu erzeugen. Dies geschieht durch Phasenumkehr der Syntheseoperatoren einer hinter dem Array platzierten Quelle. Die virtuelle Quelle kann allerdings nur wahrgenommen werden, wenn sie zwischen HörerIn und Array zu liegen kommt. Es ist nicht möglich, um die Quelle herum zu gehen. Alias-Effekte führen zu beträchtlichen Klangfärbungen[1]. Raumreflexionen der realen Lautsprecher manifestieren eher das Array als wahren Quellort und stören die Ausprägung der fokussierten Quelle. Darüber hinaus bewirkt die Phasenumkehr ein voraus eilendes Signal der weit von der virtuellen Quelle entfernten Lautsprecher, wodurch sich für die Hörerin inkonsistente interaurale Pegel- und Laufzeitdifferenzen und damit eine instabile Lokalisation ergibt.

Ein Alternativkonzept, das einerseits auf ein reguläres Lautsprecher-Layout verzichten kann und andererseits „skulpturale“ Quellen erzeugt, die von allen Seiten wahrgenommen werden können, stellt der Zeitumkehrspiegel (*time reversal mirror*, TRM) dar. Die aus

der Medizintechnik und der Unterwasserakustik bekannte Technik kann auch für den Hörschallbereich eingesetzt werden [2,3,4].

Das TRM-Prinzip basiert auf der Invarianz der Wellengleichung gegen Zeitumkehr. Für die Implementierung werden zuerst Raumimpulsantworten (IR) von der Position der geplanten fokussierten Quelle zu den Positionen der Array-Lautsprecher gemessen und anschließend von den Lautsprechern in umgekehrter Zeitrichtung wieder gegeben. Die von den Lautsprechern abgestrahlten Wellen konvergieren im Fokus-Punkt. Der TRM stellt einen zeitlich-räumlichen *matched filter* dar. Die in der WFS unerwünschten Raumreflexionen wirken beim TRM nützlich, da sie für jeden Array-Lautsprecher mehrere Spiegelquellen erzeugen und damit die wirksame Array-Apertur und Quellenanzahl erhöhen. Dadurch kommt es verglichen mit herkömmlichem Freifeld-Beamforming zu einer verstärkten Fokussierung (*super resolution*), die in chaotischen verlustlosen Hohlräumen selbst mit einer einzigen Quelle zu beobachten ist [5]. Für Anwendungen im Hörbereich ist eine unregelmäßige Verteilung der Lautsprecher daher möglich und sogar wünschenswert. Abb.1 zeigt das TRM-Wellenbild in einem Rechteckraum mit 6m x 4m mit 18 zufällig verteilten Lautsprechern am Beginn der divergenten Phase.

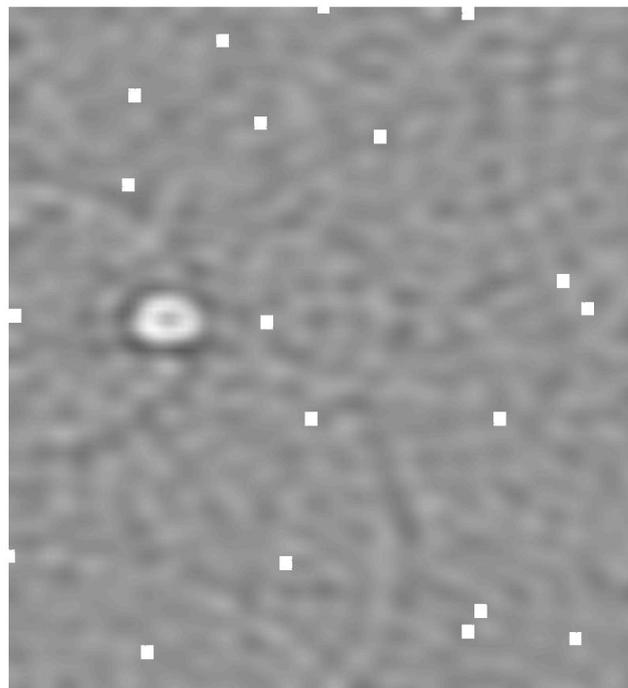


Abbildung 1: TRM-Wellenbild in einem Rechteckraum mit 18 zufällig verteilten Quellen kurz nach Beginn der divergenten Phase (Fokus links-mittig)

Die zeitliche und räumliche Fokussierungsleistung sind in den Abbildungen 2 und 3 dargestellt, wobei die für Audiozwecke ungünstige Ausprägung von Vorechos vor dem Hauptimpuls auffällt. Um diese zu verhindern, können die einzelnen IRs in Abhängigkeit von einer bevorzugten Hörposition beschnitten werden. Dies führt wiederum in Richtung WFS und reduziert die Fokussierungsleistung.

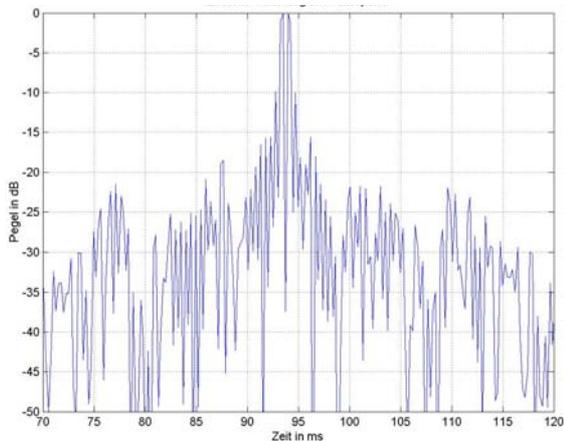


Abbildung 2: Zeitliche Verteilung der Impulsantwort am Fokus (die Vorechos vor dem Hauptimpuls bei 93ms sind perceptiv störend).

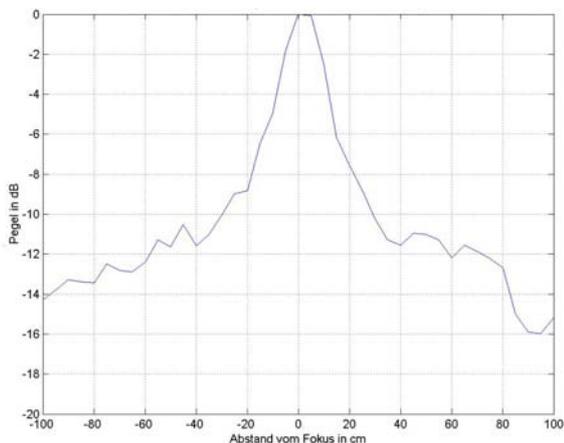


Abbildung 3: Räumliche Verteilung der IR-Maxima um den Fokuspunkt

Der TRM wurde in Graz für den IEM CUBE, einer Beschallungsanlage mit 24 Lautsprechern in der oberen Hemisphäre [6], implementiert. Messungen und erste informelle Hörversuche bestätigen einerseits die Optimierungsmöglichkeit zwischen Fokussierungsleistung und Vorechos, andererseits zeigt sich der starke Einfluss des Frequenzgangs der Strecke Lautsprecher-Raum-Mikrofon, da diese doppelt durchlaufen wird und damit quadriert in das Ergebnis einfließt. Hier sind entsprechende Entzerrungen bzw. der Einsatz von inversen Filtern [3] vorgesehen.

Ambisonics als Alternative zu WFS

Der Ambisonics-Ansatz zielt ebenso wie WFS auf eine physikalisch korrekte Schallfeldwiedergabe ab. Im Gegensatz zur WFS, die auf einer Approximation des Kirchhoff-Helmholtz-Integrals basiert, entwickelt Ambisonics ein Schallfeld in der Reihe der sphärischen Harmonischen [7] bis zur Ordnung M (*High Order*

Ambisonic, HOA) und ergibt durch die Gleichsetzung des Referenzfeldes mit dem von den Lautsprechern erzeugten Feld die Kodierungs- und Dekodierungseigenschaften des Schallfeldes. Wesentliche Vorteile sind die einfache Kodierungsvorschrift, die 3D-Fähigkeit sowie Unabhängigkeit der Kodierung von der Dekodierung, die nur vom verwendeten Wiedergabe-Layout bestimmt ist. Ein Referenzsystem für HOA wurde im IEM CUBE für Ordnung 5 realisiert [6]. Die Tauglichkeit von HOA im Festival- und Bühnenalltag wurde eindrucksvoll bewiesen [8]. Neue Entwicklungen zeigen, dass HOA in Kombination mit der Distanzkodierung von WFS endliche Quellendistanz sowie auch fokussierte Quellen erzeugen kann [9]. Daniel [7] stellt dafür *Near-Field Compensated High Order Ambisonics* als geschlossene Lösung dar und vergleicht WFS und NFC-HOA hinsichtlich Abbildungsfehler und Größe des Wiedergabebereichs.

Zusammenfassung

WFS und HOA wurden lange Zeit als disjunkte Ansätze gesehen. Erst in den letzten Jahren wurde ihre Äquivalenz gezeigt. Die Anforderungen des praktischen Einsatzes legen eine situationsabhängige Verbindung der beiden Systeme im Sinne des Besten aus beiden Welten nahe.

Die Tauglichkeit von TRM über den Einsatz für spezielle Soundeffekte hinaus wird der erfolgreichen Möglichkeit zur wahrnehmungsangepassten Optimierung und der Beherrschung der Zeitvarianz des Mediums abhängen.

Literatur

- [1] H. Wittek: Räumliche Wahrnehmung von WFS – Der Einfluss von Alias-Effekten auf die Klangfarbe. DAGA 05
- [2] S.Yon et al: Sound focusing in rooms: The time-reversal approach. JASA 113 (2003), pp1533-1543
- [3] S. Yon et al: Sound focusing in rooms. II. The spatio-temporal inverse filter. JASA 114 (2003), pp 3044-3052
- [4] Gibay et al: Time reversal imaging of noise sources inside a reverberant room. DAGA 04, p35-36
- [5] C. Draeger, M.Fink: One-channel time reversal in chaotic cavities: Experimental results. JASA 105 (1999), pp 618-625.
- [6] H. Zmölnig et al: The IEM CUBE – A periophonic Re-/Production System. AES Conf 2003, Banff.
- [7] J. Daniel et al: Further Investigations of High Order Ambisonics and Wavefield Synthesis for Holophonic Sound Imaging. 114th AES Conv. Amsterdam 2003, paper 5788
- [8] M.Noisternig et al: "Lost Highway"- Live-Elektronik und 3D-Beschallung im zeitgenössischen Musiktheater. Tonmeistertagung 2004.