

Wellenfeldsynthese: Untersuchungen zu Alias-Artefakten im Ortsfrequenzbereich und Realisierung eines praxistauglichen WFS-Systems

Dieter Leckschat, Michael Baumgartner

University of Applied Sciences, Duesseldorf, Germany Email: dieter.leckschat@fh-duesseldorf.de

Die akustische Wellenfeldsynthese (WFS) ist seit Jahren in vielen Facetten bekannt, jedoch kam es bedingt durch den erhöhten Aufwand kaum zu Realisierungen außer einigen Spezialanfertigungen. Die Autoren haben zunächst einige Grundlagen der WFS ausgearbeitet und anschliessend ein praxistaugliches und kostengünstiges System konzipiert und realisiert.

Untersuchungen im Ortsfrequenzbereich

Untersucht wurden insbesondere Artefakte, die in der örtlich diskreten Abtastung und Rekonstruktion eines Schallfeldes begründet sind (spatial aliasing). Im Zuge einer Simulation wurden Schallfelder, welche durch die Wellenfeldsynthese entstehen, berechnet und mit einem signaltheoretischen Ansatz beschrieben. Die Ausprägung von Wellen in einer Hörzone wurde mittels zweidimensionaler Fouriertransformation in den Ortsfrequenzbereich transformiert. Aus der Beschreibung des Syntheseprozesses im Ortsfrequenzbereich ergeben sich Kriterien für das Auftreten von Aliasartefakten. Beispielsweise entspricht eine Zeile von Punktstrahlern einer räumlichen Diracstoss-Folge (Abb. 1). Im Bereich der Fouriertransformierten entspricht diese Anordnung einem „Dirac-Gitter“. Strahlt jeder einzelne Lautsprecher eine Kugelwelle ab (Abb. 2), kann die Schallfelderzeugung als Faltung einer Kugelwelle mit der Diracfolge interpretiert werden. Demgemäß müssen im (Orts-)Frequenzbereich die Elemente multipliziert werden, woraus sich bei korrekter Synthese ein einziger Schnittpunkt ergibt, der die sich in z-Richtung ausbreitende Ebene Welle beschreibt (Abb. 3 und 4). In den Abbildungen ist jeweils links ein Raumbereich von 4x4 Meter dargestellt, ggf. mit einer LS-Zeile von 24 Elementen. Rechts findet sich das zugehörige Ortsspektrum. Abbildung 4 zeigt die Erzeugung einer in Normalenrichtung abgestrahlten Welle unterhalb der „räumlichen Abtastfrequenz“ $f_s = c/d$. Übersteigt die Signalfrequenz bei diesem Abstrahlwinkel f_s , so treten mehrere Schnittpunkte im Spektralbereich auf, und es entstehen unerwünschte Wellenanteile (Aliasing, Abb. 5 und 6). - Gemäß den Gesetzmäßigkeiten der Fouriertransformation können die Verzögerungen, die zur Abstrahlung von Ebenen Wellen ausserhalb der Normalenrichtung nötig sind, als Verschiebung des Spektrums im Ortsfrequenzbereich interpretiert werden, es entsteht eine zusätzliche x-Komponente im Wellenfeld (Abb. 7). Dadurch ändert sich das Kriterium für artefaktfreie Konstruktion des Wellenfeldes; im Extremfall eines Abstrahlwinkels von 90° (end fire array) ergibt sich das bekannte Kriterium, nach dem $f < f_s/2$ sein muss.

Realisierung eines WFS-Wiedergabesystems

Von der FH Düsseldorf wird ein System vorgestellt, welches durch den bevorzugten Einsatz von handelsüblichen Komponenten mit besonders günstigem Preis-/Leistungsverhältnis und eine mögliche Vorverarbeitung der Audio-

signale gekennzeichnet ist. Es ist geeignet für Präsentationen oder Messeauftritte sowie für die Produktion und Wiedergabe von Ton- und Filmerzeugnissen.

Hardware: Das System zur Wiedergabe von WFS-Produktionen besteht aus Modulen, die jeweils acht Lautsprecherkanäle umfassen. Die Ansteuerung erfolgt dabei über die digitale ADAT-Schnittstelle mittels einer Glasfaserverbindung, über welche die digitalen Daten seriell übertragen werden. In den Lautsprechermodulen sind Achtfach-D/A-Wandler enthalten, deren Rauschabstand 100 dB übersteigt. Im Signalweg folgt für jeden Kanal eine digital gesteuerte, analoge Pegelregelung mit Hilfe eines integrierten Bausteins, wie er heute etwa in Mehrkanalverstärkern eingesetzt wird. Vorteilhaft ist, dass die Steuerung über einen seriellen Bus (SPI-Bus) geschieht, der von Modul zu Modul durchgeschleift werden kann; somit ist eine Regelung der Gesamtlautstärke mit einer Infrarot-Fernbedienung möglich. - Weiter im Signalweg kommen Endstufen zum Einsatz, die mit einer Leistung von 60 Watt pro Kanal reichlich dimensioniert sind. Schliesslich dienen Zweiwegelautsprecher mit 13cm-Tieftönern der Schallabstrahlung. Diese mit 20 Euro Stückpreis sehr günstigen Lautsprecher wurden nach einer umfangreichen Testphase ausgewählt, bei der auch wesentlich teurere und anfangs erfolversprechende Lautsprecher verworfen wurden. An den „Grundklang“ der in einem WFS-System verwendeten Lautsprecher müssen selbstverständlich recht hohe Mindestanforderungen gestellt werden. Die Materialkosten für ein 64-kanaliges WFS-System mit PC und Audiohardware belaufen sich so auf etwa 10 T€, die Kosten für jedes 8er-Modul liegen deutlich unter 1000 €.

Software: Die erste, wiedergabeorientierte Implementierung sieht eine Vorverarbeitung der Audiosignale vor. Dabei werden Quellsignale, die zunächst ortsfest sind, mit einer Anzahl von Impulsantworten gefaltet, um die Ansteuerungssignale für jede beteiligte Lautsprecherbox zu erzeugen. Die Impulsantworten wurden mit Matlab berechnet, die Faltung kann innerhalb eines Harddiscrecording-Programms (z.B. Nuendo) geschehen. Bei der Wiedergabe werden nur noch die vorbereiteten Signale abgespielt, wobei ein PC ohne weiteres 60 bis 100 Spuren wiedergeben kann. - Diese Art der Signalverarbeitung ist für feste Lautsprecherkonfigurationen, also etwa für Messesysteme, gut geeignet.

In einem zweiten Schritt wurde die Entwicklungsumgebung Max/MSP für die Software-Erstellung eingesetzt. Max/MSP ist eine objektorientierte Umgebung, welche direkt mit gängiger Audiohardware (RME) zusammenspielt. Auch sind die benötigten Signalverarbeitungsfunktionen wie FIR-Filter, Delays etc. als fertige Objekte integriert. Dadurch konnte innerhalb sehr kurzer Zeit eine WFS-Implementierung inklusive bewegter Schallquellen erstellt werden.

Analyse einer WFS-Anordnung in Matlab: Ortssignale

- Idee: Formulierung der Wellenfeldsynthese durch Operationen mit Ortssignalen
- Fourier-Korrespondenzen:

Position der Lautsprecher: eindimensionale Kammfunktion im Raum Abtastabstand d

Im zweidimensionalen Ortsfrequenzraum: „Dirac-Gitter“ mit der Abtastfrequenz f_s

DAGA 2005 Dieter Leckschat, Michael Baumgartner - FH Dusseldorf

Abb. 1

Analyse einer WFS-Anordnung in Matlab: Beispiele

$f = 4000\text{Hz}$ und $f > f_s$

Aliasartefakte als zusätzliche ebene Wellen! (spatial aliasing)

Mehrere Schnittpunkte – Artefaktbildung!

DAGA 2005 Dieter Leckschat, Michael Baumgartner - FH Dusseldorf

Abb. 5

Analyse einer WFS-Anordnung in Matlab: Ortssignale

Jeder einzelne Lautsprecher ruft als Kugelstrahler ein rotationssymmetrisches Schallfeld hervor.

für periodisches Signal: rotationssymmetrisches Ortspektrum mit einer radialen Ortsfrequenz f

DAGA 2005 Dieter Leckschat, Michael Baumgartner - FH Dusseldorf

Abb. 2

Analyse einer WFS-Anordnung in Matlab: Grenzen

- Kriterium für die artefaktfreie Synthese von ebenen Wellen mit Einfallswinkel 0° :

$$f < f_s$$

- bei der realisierten Anlage z.B. $f < 2300\text{Hz}$

DAGA 2005 Dieter Leckschat, Michael Baumgartner - FH Dusseldorf

Abb. 6

Analyse einer WFS-Anordnung in Matlab: WFS als Faltung

- Alle Lautsprecher strahlen gleichzeitig dasselbe Signal ab: als Faltungsoperation beschreibbar!

Faltung im Ortsbereich

Im Ortsfrequenzbereich: Multiplikation von „Dirac-Linien“ – Schnitt der Spektren

DAGA 2005 Dieter Leckschat, Michael Baumgartner - FH Dusseldorf

Abb. 3

Analyse einer WFS-Anordnung in Matlab: Beliebige Winkel

- Ebene Wellen in beliebigen Winkeln: Anwendung des Modulationsgesetzes
- Verzögerung im Ortsraum \Leftrightarrow Verschiebung im Frequenzraum
- Dirac-Gitter wird um die x -Komponente der zu synthetisierenden Welle verschoben

DAGA 2005 Dieter Leckschat, Michael Baumgartner - FH Dusseldorf

Abb. 7

Analyse einer WFS-Anordnung in Matlab: Beispiele

Beispiel:

ebene Welle 0° Einfallswinkel

$f = 2000\text{Hz}$ und $f < f_s$

ohne Artefakte

Nur ein Schnittpunkt der Spektren

DAGA 2005 Dieter Leckschat, Michael Baumgartner - FH Dusseldorf

Abb. 4

Analyse einer WFS-Anordnung in Matlab: Beispiele

Abstrahlwinkel 15°

→ Entstehung von asymmetrischen Spektren

DAGA 2005 Dieter Leckschat, Michael Baumgartner - FH Dusseldorf

Abb. 8