

Räumliche Wahrnehmung von Wellenfeldsynthese: Der Einfluss von Alias-Effekten auf die Klangfarbe

Helmut Wittek^{1,2}, Tobias Augustin³

¹ Institut für Rundfunktechnik, München, Deutschland, Email: wittek@irt.de

² Institute of Sound Recording, University of Surrey, Guildford, UK

³ AG Technische Akustik, MMK, TU München, München, Deutschland, jetzt: ENT GmbH, Burghausen

Einleitung

Wellenfeldsynthese (WFS, [1]) ist eine Wiedergabetechnik, die es erlaubt, virtuelle Schallfelder mit Hilfe von Lautsprecherarrays entstehen zu lassen. Die Eigenschaften des virtuellen Schallfelds sind dabei dem Original sehr ähnlich, wenn auch nicht kongruent ([2]). Das wirft die Frage auf, welche Übereinstimmungen und Unterschiede in Bezug auf die auditive Wahrnehmung bestehen. Die Unzulänglichkeiten des virtuellen Schallfelds führen zu bestimmten Konsequenzen auch für die räumliche Wahrnehmung. Dabei wirken *Alias-Effekte* negativ auf Lokalisation sowie Klangfarbe der virtuellen Quelle. Es werden Ergebnisse einer aktuellen Studie ([3]) zur Wahrnehmbarkeit von Alias-Effekten präsentiert. Es zeigt sich, dass virtuelle Quellen an verschiedenen Orten hörbare Unterschiede bei der Klangfarbe erzeugen. Am besten verhält sich die Stereophonie, bei der weniger Unterschiede wahrgenommen werden. Diese Beobachtung steht im Gegensatz zu den messbaren Unterschieden im Spektrum der Ohrsignale.

Problemstellung

Alias-Effekte bei WFS sind wahrnehmbar durch:

- relative Änderungen der Klangfarbe bei verschiedenen Quellenpositionen
- Verschlechterung der Lokalisationsqualität

WFS erzeugt einen ebenen Frequenzgang der virtuellen Quelle bis zur so genannten Alias-Frequenz. Über dieser Grenze treten Alias-Effekte auf, die das Quellsignal örtlich und spektral verzerren. Der unebene Frequenzgang des Schallfelds über der Alias-Frequenz muss nicht unbedingt hörbar sein. Allerdings kann das Schallfeld über der Alias-Frequenz nur grob entzerrt werden, da die Alias-Effekte ortsabhängig sind. Daher sind bei Änderungen der Quell- bzw. Hörerposition Alias-Effekte hörbar. Dies kann in reflektionsarmer Umgebung demonstriert werden. Die reflektive Umgebung in normalen Räumen nivelliert die Einbrüche im Frequenzspektrum und mittelt die spektralen Unterschiede etwas aus. Allerdings kann unter Verwendung kritischer Testsignale (Rosa Rauschen) auch in normalen Räumen diese Phänomene wahrgenommen werden. Dabei treten gewisse Unterschiede zwischen WFS-Systemen verschiedener Güte (=versch. Alias-Frequenz) auf. Der Vergleich mit Phantomschallquellen, also stereophonen Quellen, die durch zwei Lautsprecher erzeugt werden, ordnet die unterschiedlichen Artefakte ein.

Versuchsaufbau

Das lineare WFS-Array im Tonstudio des IRT besteht aus 32 ELAC Klein-Lautsprechern, die im Abstand Δx von jeweils 12cm montiert sind (Länge 3,72m):

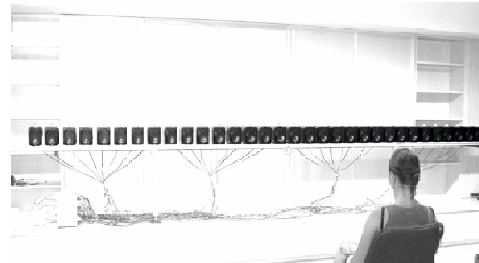


Abbildung 1: WFS-Array im IRT mit Versuchsperson, 32 ELAC-Lautsprecher, $\Delta x=12\text{cm}$, Länge 3,72m

Es wurden virtuelle Schallfelder mit verschiedenen Alias-Frequenzen von 0,8 bis 8,0 kHz erzeugt. Um dies zu erreichen, machte man sich zwei Gesetzmäßigkeiten zunutze:

- Die Alias-Frequenz ist abhängig vom Abstand Δx zwischen den Arraylautsprechern
- Bei einer fokussierten WFS-Quelle ist die Alias-Frequenz abhängig vom Abstand Δs zwischen der virtuellen Quellenposition und der Position des Hörers.

Durch ein geeignetes Design von Lautsprecherabstand ($\Delta x=12/24/36/48\text{cm}$) und Quellen-Hörer-Abstand ($\Delta s = 0,75/1,0/1,2\text{m}$) konnten somit folgende Alias-Frequenzen erzeugt werden:

Δs	1,2 m	1,0 m	0,75 m
48 cm	0,8 kHz	1,2 kHz	2 kHz
36 cm	1,0 kHz	1,5 kHz	2,5 kHz
24 cm	1,6 kHz	2,5 kHz	4,0 kHz
12 cm	3,2 kHz	5,0 kHz	8,0 kHz

Versuchsdurchführung

Um nun die Klangfarbenänderungen zwischen verschiedenen Positionen beurteilen zu können, wurden Quellen in 4 verschiedenen **Richtungen** erzeugt. Die Stimuli von jeweils 2s Länge wurden nacheinander - ohne Überlappung, Fade-In, Out=200ms - über Quelle 1→2→3→4→3→2→1 wiedergegeben. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, wanderte somit das Quellsignal von rechts nach links und wieder zurück. Als **Stimuli** dienten Rauschimpulse (Breitband sowie Tiefpassgefiltert mit $f_g=1,0/1,7/2,7/4,3$ kHz) bzw. weibliche Sprache.

Die Versuchsperson befindet sich in einem Abstand von 1,5m vom Array, auf das Array schauend. Neben den verschiedenen virtuellen WFS-Quellen wurden auch **Phantomschallquellen** wiedergegeben. Dazu wurden die Arraylautsprecher Nr.9 und 24 genützt (Basisbreite= 180cm) und mit geeigneten Pegel- und Zeitdifferenzen beaufschlagt, um eine den Quellrichtungen entsprechende Auslenkung der Phantomschallquellen zu erreichen. Die theoretische Alias-Frequenz dieser stereophonen Darbietung liegt unter 1 kHz.

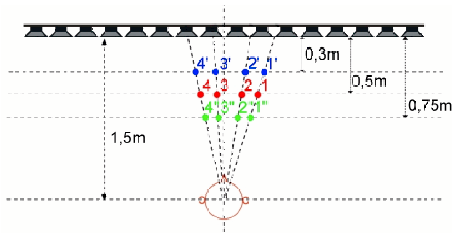


Abbildung 2: Versuchsaufbau mit linearem Array, Versuchsperson und verschiedenen fokussierten Quellen

Die Versuchspersonen hatten die Aufgabe, die wahrgenommenen Klangfarbenänderungen in der dargebotenen Sequenz zu bewerten (Skala von 0=nicht wahrnehmbar bis 10=sehr deutlich wahrnehmbar). Außerdem sollte die Lokalisiertheit der wiedergegebenen Quelle beurteilt werden (Skala von 0=nicht lokalisierbar bis 10=sehr deutlich lokalisierbar). Es nahmen 11 überwiegend geübte Versuchspersonen teil.

Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl *Alias-Frequenz* als auch *Quellen-Hörer-Abstand Δs* ein signifikanter Faktor bei der Bewertung der Klangfarbenänderungen sind. Abbildung 3 zeigt die Lokalisiertheit sowie den Grad der Klangfarbenänderungen in Abhängigkeit von der Alias-Frequenz. Als Parameter ist der Quellen-Hörer-Abstand Δs angegeben.

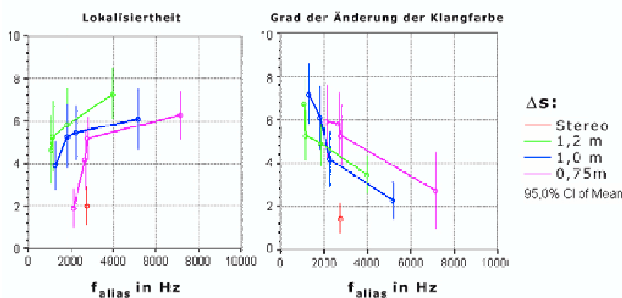


Abbildung 3a: Lokalisiertheit, Abbildung 3b: Klangfarbenänderung

Mit steigender Alias-Frequenz verbessert sich die Lokalisiertheit und sinkt der Grad der Klangfarbenänderung. Der Parameter Δs beeinflusst das Ergebnis deutlich.

Für jeden einzelnen Quellen-Hörer-Abstand Δs besteht ein streng monotoner Zusammenhang zwischen Alias-Frequenz (bzw. Arraylautsprecherabstand Δx) und Grad der Klangfarbenänderung sowie Lokalisiertheit. Deutlich hebt sich das Ergebnis für die Phantomschallquelle vom Rest der Ergebnisse ab. Hier wurden mit die geringsten Klangfarbenänderungen wahrgenommen. Dies deutet darauf hin, dass bei der Stereophonie, möglicherweise im Gegensatz zur WFS, kein direkter Zusammenhang zwischen spektraler Zusammensetzung des Ohrsignals und wahrgenommener Klangfarbe besteht. Dies war schon von Theile beschrieben worden ([4]), der es darauf zurückführt, dass das Gehör die zwei Lautsprecherorte erkennt und deshalb die einzelnen Signale weitgehend unabhängig von der Wirkung der Überlagerungseffekte verarbeitet („Assoziationsmodell“).

Die Lokalisiertheit (Abbildung 3a) verschlechtert sich mit abnehmendem Quellen-Hörer-Abstand. Dies könnte ein Grund dafür sein, dass der Quellen-Hörer-Abstand Δs auch

die Ergebnisse für die Klangfarbe beeinflusste. Durch eine schlechtere Lokalisiertheit ist auch die Wahrnehmung der Klangfarbe gestört, da die wahrgenommenen Ohrsignale keiner präzisen Richtung mehr zugeordnet werden können. Außerdem lässt sich durch Simulation/Messung zeigen, dass es erhebliche Unterschiede zwischen den Schallfeldern im Alias-Bereich gibt, auch wenn die Alias-Frequenz übereinstimmt. So ist bei Simulationen des ILD-Spektrums bei den WFS-Systemen mit größerem Δx die maximale Amplitude des Alias-Effekts wesentlich größer ([3]).

In Abbildung 4 wurden Klangfarbenänderung und Lokalisiertheit gegeneinander angetragen. Es ist zu sehen, dass bei allen WFS-Quellen ein gewisser Zusammenhang besteht, während die Phantomschallquelle deutlich davon abweicht.

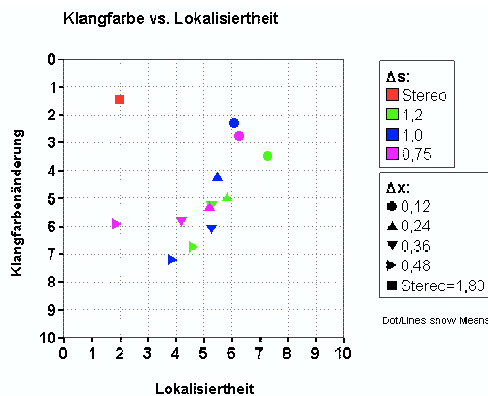


Abbildung 4: Klangfarbenänderung vs. Lokalisiertheit, Die WFS-Quellen heben sich von den Phantomschallquellen (rot, Quadrat) ab, die kaum Klangfarbenänderungen zeigen.

Fazit

Die Untersuchung zeigte, dass Alias-Effekte die Wahrnehmung der virtuellen Quelle beeinflussen. Dabei hängt die Qualität sowohl von der Alias-Frequenz als auch von anderen Faktoren ab, die noch näher geklärt werden müssen.

Die Phantomschallquelle stellte sich als äußerst robust gegenüber Klangfarbenänderungen heraus. Dies könnte Rückschlüsse auf die generelle Art zulassen, wie stereophone Quellen wahrgenommen werden, da die tatsächlichen spektralen Veränderungen am Ohr durchaus erheblich waren.

Literatur

- [1] Berkhout, A.J. et al.: “Acoustic Control by Wave Field Synthesis” J. Acoust. Soc. Am., Vol.93, pp.2764ff, 1993.
- [2] Wittek, H., 2003: “Perception of Spatially synthesized sound fields – Literature review about WFS”, erhältlich online: <http://www.hauptmikrofon.de/wfs.htm>
- [3] Augustin, T., 2001: „Zur Wahrnehmbarkeit von Klangfarbenänderungen bei Wellenfeldsynthese“. Entwurf der Diplomarbeit IRT/ TU München, erhältlich online: <http://www.hauptmikrofon.de/wfs.htm>
- [4] Theile, G.: “Über die Lokalisation im überlagerten Schallfeld”, Dissertation, TU Berlin, 1980, erhältlich online: <http://www.hauptmikrofon.de/theile.htm>
- [5] Wittek, H. et al., 2004: “Spatial perception in Wave Field Synthesis rendered sound fields: Distance of real and virtual nearby sources”, Preprint No. 6000, AES 116th convention, Berlin, Germany