

# Die Rolle des Präzedenzeffektes bei der Wahrnehmung von räumlichen Aliasingartefakten bei der Wellenfeldsynthese

Hagen Wierstorf, Sascha Spors und Alexander Raake

Deutsche Telekom Laboratories, Technische Universität Berlin, Email: hagen.wierstorf@telekom.de

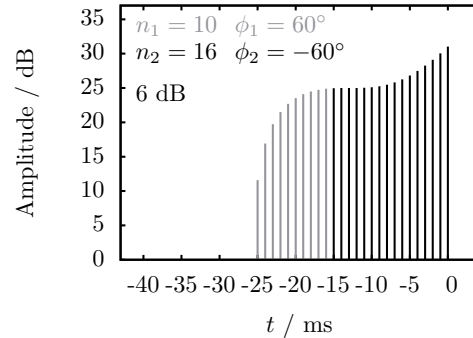
## Einleitung

Bei der Wellenfeldsynthese (WFS) handelt es sich um ein vielkanaliges Schallreproduktionsverfahren, das in der Lage ist das Wellenfeld äußerer virtueller Quellen in einem Zuhörerbereich zu synthetisieren [1]. Unter Ausnutzung der zeit-inversen akustischen Fokussierung [2] ist zudem die Wiedergabe von sogenannten fokussierten Quellen im Zuhörerbereich möglich. Da zur Synthese des Wellenfeldes eine räumlich kontinuierliche Verteilung von Lautsprechern nötig wäre, kommt es bei den in der Praxis verwendeten Lautsprecherarrays zu einer räumlichen Unterabtastung. Diese kann zu wahrnehmbaren Artefakten oberhalb der räumlichen Aliasingfrequenz  $f_{al}$  führen [3]. Im zeitlichen Bereich machen sich diese für fokussierte Quellen durch das Auftreten von hochfrequenten Echos bemerkbar, die vor dem Signal der fokussierten Quelle beim Zuhörer eintreffen, den sogenannten Vor-Echos.

Erste Untersuchungen [3] haben gezeigt, dass die Vor-Echos zu der Wahrnehmung von mehreren Quellen oder einer Quelle aus einer anderen Richtung als der der fokussierten Quelle führen können. Daher ist es von Interesse das Phänomen des Präzedenzeffektes (siehe z.B. [4]) im Hinblick auf fokussierte Quellen zu untersuchen. In der bisherigen Literatur wurde der Präzedenzeffekt zumeist in der klassischen Variante mit einem Signal und einem Echo oder aber für die Lokalisation in Räumen untersucht. Selten jedoch im Fall von vielen Echos, die dem Signal voraus eilen und einen gleichmäßigen Abstand aufweisen. Daher ist in der vorliegenden Studie die Lokalisationsdominanz für viele Vor-Echos aus zwei unterschiedlichen Richtungen untersucht worden.

## Methode

**Stimuli:** Es wurden Impulsantworten für die einzelnen Bedingungen erzeugt, die dann während der Wiedergabe dynamisch mit dem Sprachmaterial einer weiblichen Sprecherin gefaltet worden sind. Aus den beiden Richtungen  $(\phi_1, \phi_2) \in [(60^\circ, -60^\circ), (-60^\circ, 60^\circ)]$  wurden jeweils  $n_1 = 2, 6, 10$  bzw.  $n_2 = 2, 4, 8, 16, 32$  Vor-Echos mit unterschiedlicher Amplitude (vgl. Abb. 1) und einem jeweiligem zeitlichen Abstand von 1 ms in den Impulsantworten modelliert. Dabei wurden die verwendeten Richtungen mit einem HRIR Datensatz realisiert. Der gleiche Datensatz wurde auch verwendet, um die Simulation des Lautsprecherarrays in [3] durchzuführen. Die Amplitude der einzelnen Vor-Echos wurde durch einen festen Amplitudenverlauf über die Gesamtzeit der jeweiligen Impulsantwort realisiert. Als Amplitudenverlauf kamen dabei vier Bedingungen in Frage: 0 dB, 3 dB, 6 dB und



**Abbildung 1:** Impulsantwort einer verwendeten Bedingung. Es ist die Anzahl der Vor-Echos  $n_1, n_2$  aus den beiden Richtungen  $\phi_1, \phi_2$  und ihr Amplitudenverlauf zu erkennen. Der Absolutwert der Amplitude stimmt nicht mit dem bei der Darbietung verwendeten überein. Das eigentliche Signal wird bei  $t = 0$  ms abgegeben.

10 dB. Dabei bezeichnet der dB-Wert den Amplitudenunterschied zwischen dem eigentlichen Signal (Puls bei  $t = 0$  ms) und dem zeitlich in der Mitte liegenden Vor-Echo. In Abbildung 1 ist ein Stimulus mit einem Amplitudenverlauf von 6 dB zu erkennen. Insgesamt führte dies zu 60 verschiedenen Bedingungen.<sup>1</sup>

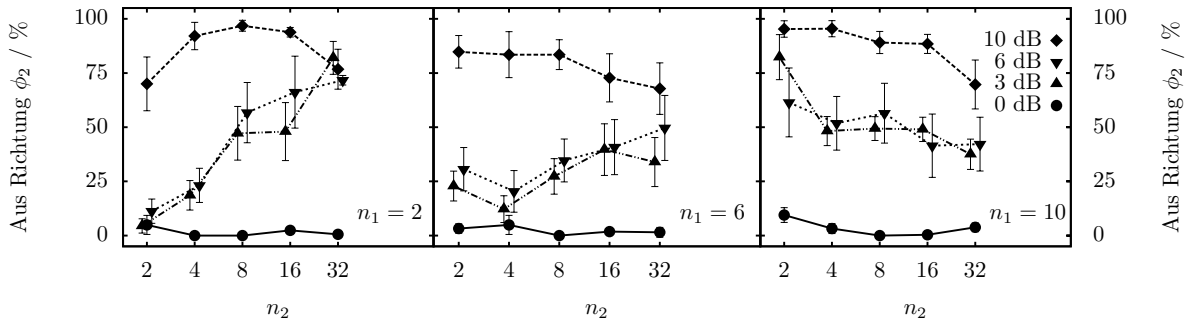
**Darbietung:** Die Bedingungen wurden den Versuchspersonen in einem 2 AFC-Verfahren dargeboten. Dabei wurde ein Stimulus zweimal präsentiert, jedoch beim zweiten Mal mit einer Vertauschung der beiden Kopfhörersignale vom rechten und linken Ohr. Aufgabe der Versuchspersonen war es zu antworten, ob die Sprecherin im zweiten Stimulus eher von links oder von rechts kam, verglichen mit dem ersten Stimulus. Dies wurde für die Amplitudenverläufe mit 3 dB und 6 dB je zwölfmal pro Bedingung abgefragt und je sechsmal für die anderen beiden Amplitudenverläufe.

**Durchführung:** An dem Versuch nahmen 10 normalhörende Versuchspersonen zwischen 20 und 33 Jahren teil, die für ihre Teilnahme keine Aufwandsentschädigung erhielten. Die Darbietung erfolgte mit Hilfe dynamischer binauraler Resynthese über einen Kopfhörer AKG K601 und mit Hilfe eines Headtrackers Polhemus Fastrack.

## Ergebnisse

In Abbildung 2 sind die Ergebnisse als Mittelwert über alle 10 Versuchspersonen mit Standardabweichung eingezeichnet. Dabei ist die Anzahl an Antworten der Ver-

<sup>1</sup> Audiobeispiele für die einzelnen Bedingungen finden sich unter <http://audio.qu.tu-berlin.de/?p=182>



**Abbildung 2:** Prozent der wahrgenommenen Richtung der Sprecherin aus der Richtung des Signals ( $\phi_2$ ) in Abhängigkeit der Anzahl  $n_2$  an Echos aus Richtung  $\phi_2$ . Dargestellt sind die Ergebnisse für die vier verschiedenen Amplitudenverläufe von 0 dB, 3 dB, 6 dB, 10 dB und drei verschiedene Anzahl an Echos aus der Richtung  $\phi_1$  (von links nach rechts:  $n_1 = 2, 6, 10$ ). Die Ergebnisse für die 3 dB und 6 dB Bedingungen sind etwas versetzt (in Bezug auf die  $n_2$ -Achse) dargestellt, um sie besser erkennen zu können.

suchspersonen in Prozent aufgetragen, dass sie die Sprecherin aus Richtung des Signals  $\phi_2$  wahrgenommen haben, in Abhängigkeit von der Anzahl  $n_2$  an Vor-Echos aus dieser Richtung. Die drei einzelnen Graphen zeigen die Ergebnisse für verschiedene Anzahlen  $n_1$  an Vor-Echos aus Richtung  $\phi_1$  und die jeweils vier verschiedenen Kurven für die unterschiedlichen Amplitudenverläufe.

Es ist zu erkennen, dass für einen Amplitudenverlauf von 10 dB bei allen Konditionen die Sprecherin aus der Richtung  $\phi_2$  des Signals wahrgenommen wurde, während bei einem Amplitudenverlauf von 0 dB der entgegengesetzte Fall zu beobachten ist. Die Ergebnisse für die beiden Amplitudenverläufe von 3 dB und 6 dB unterscheiden sich nicht signifikant, daher werden im Folgenden nur die Ergebnisse für 3 dB betrachtet. Bei diesen ist eine deutliche Abhängigkeit von der Verteilung der Echos in  $n_1$  und  $n_2$  zu erkennen. Für den Fall von  $n_1 = 2$  wird die Sprecherin für eine ebenfalls niedrige Anzahl an Echos in  $n_2$  aus der Richtung  $\phi_1$  wahrgenommen. Diese geht aber bei Erhöhung von  $n_2$  allmählich in  $\phi_2$  über. Dieses Verhalten ist bei  $n_1 = 6$  schwächer ausgeprägt und verschwindet komplett bei  $n_1 = 10$ . Dort ist eher eine Umkehr des Verlaufes zu erkennen.

## Diskussion

Für die Interpretation der Ergebnisse der wahrgenommenen Richtung spielt der Präzedenzeffekt, genauer die Lokalisationsdominanz eine entscheidende Rolle. Diese besagt, dass die wahrgenommene Richtung durch die Richtung der ersten Wellenfront bestimmt und in einem Zeitfenster von 1–40 ms nicht durch Echos beeinflusst wird, solange diese Echos bestimmte Bedingungen erfüllen (vgl. [4]). Gleichzeitig kommt es zu einer Fusion des Signals und der Echos zu einem gemeinsamen Hörereignis.

Im Falle des Amplitudenverlaufes von 3 dB ist für die Konditionen mit  $n_1 = 2$  eine Schwelle für die Lokalisationsdominanz von ungefähr 10 ms zu beobachten. Überschreitet die Gesamtlänge des Bereiches, in dem die Vor-Echos auftreten diesen Wert kommt es zu einem Übergang der Lokalisation hin zur Richtung des Signals.

Wird die Anzahl an Vor-Echos aus  $\phi_1$  auf  $n_1 = 6$  erhöht wird das Bild etwas unklarer. Bis hin zu einem Bereich von 14 ms Vor-Echos Verzögerung findet eine Lokalisation in Richtung der ersten Wellenfront statt. Bei größeren Verzögerungswerten gibt es keinen Übergang mehr bis  $\phi_2$ , sondern lediglich zu einer Antwort von 50%. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass die Versuchspersonen in diesen Fällen nicht mehr nur eine einzige Sprecherin wahrgenommen haben, da auch keine Fusion mehr stattfindet. Für  $n_1 = 10$  kommt es überraschenderweise für die Bedingung mit der geringsten Anzahl an Echos aus Richtung  $\phi_2$  zu der deutlichsten Lokalisierung in diese Richtung. Dies muss noch genauer untersucht werden, hängt aber vermutlich ebenfalls mit der Zeitspanne für die Lokalisationsdominanz zusammen.

Im Falle des Amplitudenverlaufes von 0 dB dominiert immer die erste Wellenfront die Lokalisation, so dass davon ausgegangen werden kann, dass für diesen flachen Amplitudenverlauf die Schwelle für die Lokalisationsdominanz oberhalb des hier betrachteten Wertes von  $t = 42$  ms liegt.

Für einen Amplitudenverlauf von 10 dB finden wir hingegen das entgegengesetzte Bild, und die Amplitude des Signals ist zu stark als dass die erste Wellenfront die wahrgenommene Richtung bestimmen könnte.

## Literatur

- [1] A.J. Berkhout, D. de Vries, P. Vogel. Acoustic control by Wave Field Synthesis. *J. Acoust. Soc. Am.* 93 (1993), 2764–2778
- [2] S. Yon, M. Tanter, M. Fink. Sound focusing in rooms: The time-reversal approach. *J. Acoust. Soc. Am.* 113 (2003), 1533–1543
- [3] S. Spors, H. Wierstorf, M. Geier, J. Ahrens. Physical and Perceptual Properties of Focused Sources in Wave Field Synthesis. 127<sup>th</sup> AES Conv. (2009)
- [4] R.Y. Litovsky, H.S. Colburn, W.A. Yost, S.J. Guzman. The precedence effect. *J. Acoust. Soc. Am.* 106 (1949), 1633–1654