

# Untersuchungen zur Crosstalk-Cancellation für mehrere Sweet-Spots

Michael Meier<sup>1</sup>, Sergej Lawrenjuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institut für Rundfunktechnik, 80687 München Deutschland, Email: meier@irt.de*

<sup>2</sup> *Technische Universität Darmstadt, 64289 Darmstadt Deutschland, Email: slawrence@gmx.de*

## Einleitung

Im Prinzip ist der Einsatz von Filtern zur Crosstalk-Cancellation (CTC) eine bekannte Technik, die bei der Wiedergabe binauraler Signale über Lautsprecher zum Einsatz kommt. Allerdings weisen die meisten bekannten Systeme nur einen einzigen, relativ kleinen Sweet-Spot auf und sind für die Beschallung nur eines Zuhörers optimal ausgelegt. Für diesen Anwendungsfall konnte in einigen Studien bereits deutlich gezeigt werden, dass sich durch bestimmte Lautsprecheranordnungen und -geometrien die allgemeine Performance eines CTC-Systems deutlich verbessern lässt [3]. Die Beschallung mehrerer Zuhörer wurde dagegen, wenn auch bereits theoretisch [2] beschrieben, noch vergleichsweise wenig untersucht. Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes 3D VIVANT<sup>1</sup> wurde daher systematisch untersucht, mit welchen Maßnahmen sich mehrere Sweet-Spots mittels CTC erzeugen lassen und wie sich diese gegenseitig beeinflussen.

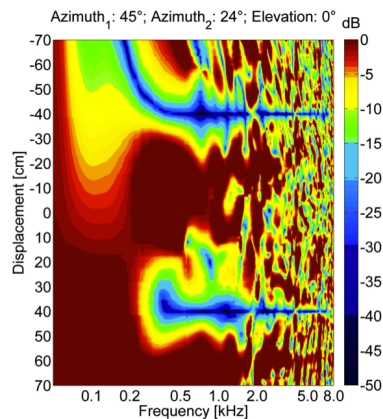
## Simulationen

Zunächst wurde eine Simulationssoftware in MatLab implementiert, mit welcher es möglich war, unterschiedlichste Wiedergabesituationen zu simulieren und auszuwerten. Auf Basis von Impulsantwortendatenbanken sowohl der kopfbezogenen Übertragungsfunktionen (Head Related Transfer Functions) eines Kunstkopfes (Neumann KU100) als auch der verwendeten Lautsprecher konnte damit für ein beliebiges Lautsprechersetup die gewünschte Anzahl an Sweet-Spots und deren Position unter Freifeld-Bedingungen simuliert werden. Für alle Situationen wurde ein optimales CTC-Filter entsprechend [3] berechnet und evaluiert werden.

Zur Bewertung eines CTC-Filters stehen verschiedene Kenngrößen zu Verfügung, welche mit Hilfe der Software ebenfalls berechnet werden konnten. Die wahrscheinlich Wichtigste ist dabei die sogenannte *Channel Separation*. Dabei handelt es sich um ein direktes Maß dafür, wie stark das Übersprechen eines binauralen Ohrsignals vom ipsilateralen auf das contralaterale Ohr gedämpft wird. Interessant ist hierbei nicht nur die Qualität im Sweet-Spot selbst, sondern das Verhalten des Systems bei Veränderung der Zuhörerposition.

Neben der reinen Wiedergabe binauraler Signale über CTC-Filter und Lautsprecher wurden auch noch weitere bekannte Methoden zur Verbesserung für mehrere

<sup>1</sup>Die Arbeiten des Forschungsprojektes 3D VIVANT (3D Live Immersive Video-Audio-Interactive Multimedia) werden seitens der EU im Rahmen von FP7-ICT gefördert (Vertragsnummer 248420). <http://www.3dvivant.eu>



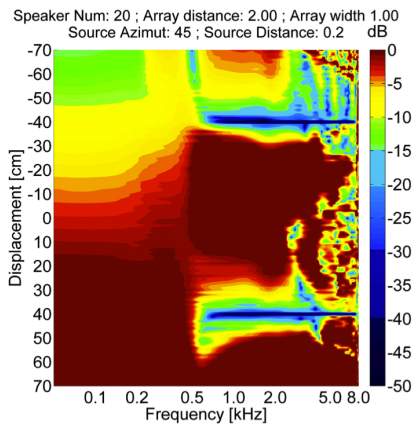
**Abbildung 1:** Channel Separation (linkes Ohr) für zwei Sweet Spots bei  $x = \pm 0,40 m$  und  $y = 0 m$  in Abhängigkeit der Frequenz und des seitlichen Versatzes der Zuhörer. Relativ zu jedem Sweet Spot wurden je 4 Lautsprecher in Ohrhöhe unter den Winkeln  $\phi_1 = \pm 12^\circ$  und  $\phi_2 = \pm 24^\circ$  in  $1,2 m$  Abstand positioniert.

Zuhörer simuliert und evaluiert. Am vielversprechendsten zeigte sich dabei eine Verbindung von Wellenfeldsynthese (WFS) und CTC [4]. Im Folgenden sollen deshalb die Ergebnisse sowohl für die „klassischen“ CTC-Variante sowie für die CTC-WFS-Kombination, genauer vorgestellt werden.

Neben der reinen Simulation wurden ausgewählte Konfigurationen ebenfalls im Reflexionsarmen Raum vermessen, um Simulationsergebnisse mit realen Messdaten verifizieren zu können und sich einen subjektiven Höreindruck zu verschaffen.

## Crosstalk-Cancellation für mehrere Zuhörer

Ein typisches Ergebnis für ein einfaches Setup eines CTC-Filters für mehrere Zuhörer ist in Abbildung 1 zu sehen. Hierbei wurde die Channel Separation für zwei nominale Sweet-Spots bei  $x = \pm 0,40 m$  und  $y = 0 m$  bei einer lateralen Bewegung der Zuhörer parallel zu den Lautsprechern ausgewertet. In diesem Beispiel wurden für jeden Zuhörer vier Lautsprecher auf Ohrhöhe unter den Winkel  $\phi_1 = \pm 24^\circ$  und  $\phi_2 = \pm 12^\circ$  in  $1,2 m$  Abstand relativ zum jeweiligen Sweet Spot verwendet. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich zwar wie gewünscht prinzipiell zwei Sweet-Spots ausbilden. Jedoch lässt sich nicht einmal in diesen Positionen eine gute Kanaltrennung über den gesamten betrachteten Frequenzbereich erzielen. Ein leichter Versatz der Zuhörers führt dabei schon zu einem deutlichen Einbruch der Kanaltrennung. Gerade in



**Abbildung 2:** Channel Separation (linkes Ohr) für zwei Sweet Spots bei  $x = \pm 0,40\text{ m}$  und  $y = 0\text{ m}$  in Abhängigkeit der Frequenz und des seitlichen Versatzes der Zuhörer. Relativ zu jedem Sweet Spot wurden je 2 fokussierte Quellen in Ohrhöhe unter den Winkeln  $\phi = \pm 45^\circ$  in  $0,2\text{ m}$  Abstand erzeugt. Dazu wurde eine Linienarray mit 20 Lautsprechern und einer Länge von  $1\text{ m}$  verwendet.

höheren Frequenzbereichen sind die Ausprägungen dieser Einbrüche zudem noch stark frequenzabhängig. Auch im Bereich zwischen zwei gewünschten Abhörpositionen sind deutliche Artefakte zu erkennen, welche zu wahrnehmbaren Klangverfärbungen führen können. Insgesamt konnte auf diese Weise eine ungefähre Sweet-Spot-Größe von maximal  $10\text{ cm}$  erreicht werden, was einer deutlichen Verschlechterung gegenüber der Situation mit nur einem Zuhörer entspricht [3]. Sowohl in realen Messungen als auch in subjektiver Überprüfung konnte dieser schlechte Eindruck bestätigt werden.

Es konnte außerdem festgestellt werden, dass durch Veränderung der Lautsprecheranordnung keine entscheidenden Verbesserungen für den Mehrbenutzerfall erzielt werden. So sind gerade auch nah aneinander positionierte oder elevierte Lautsprecher, welche sich für einen einzelnen Zuhörer besonders gut eignen, für mehrere Zuhörer schlecht geeignet. Insgesamt konnte kein übliches CTC-Setup für mehrere Nutzer befriedigende Ergebnisse erzielen.

## Kombination Wellenfeldsynthese und Crosstalk-Cancellation-Filter

Eine Kombination von CTC-basierter Wiedergabe und Wellenfeldsynthese erwies sich dagegen als wesentlich robuster. Bei diesem Verfahren werden mittels eines Lautsprecherarrays sogenannte fokussierte Quellen nahe am Kopf des Zuhörers erzeugt. Eben diese Quellen können nun als virtuelle Lautsprecher für ein CTC-System verwendet werden. Die Qualität dieses Verfahrens für einen Zuhörer ist bereits bekannt[4], kann aber, wie die vorliegende Untersuchung zeigt, für mehrere Nutzer erweitert werden.

In Abbildung 2 ist ein typisches Ergebnis für zwei Sweet Spots, welche mit Hilfe eines WFS-Systems erzeugt wurden, zu sehen. In diesem Beispiel wurde ein Linienarray

mit 20 Lautsprechern in zwei Metern Abstand zu den Zuhörern verwendet. Die damit erzeugten fokussierten Quellen befanden sich in  $0,2\text{ m}$  Abstand vom jeweiligen Sweet Spot entfernt unter einem Winkel von  $\pm 45^\circ$  auf Ohrebene.

Gerade im Vergleich zum vorherigen Beispiel ist klar zu erkennen, dass in diesem Fall an den gewünschten Abhörpunkten eine gute Kanaltrennung über den gesamten betrachteten Frequenzbereich erreicht werden kann. Auch ergibt sich eine leichte Verbreiterung der möglichen Abhörfläche für beide Zuhörer, welche ebenfalls über einen durchgängigen Frequenzbereich wirksam wird. Auch treten im Bereich zwischen den gewünschten Abhörpositionen deutlich weniger Artefakte auf. Dafür wird allerdings, zumindest in diesem Beispiel, eine größere Anzahl an Lautsprechern benötigt.

Ebenfalls untersucht wurde der Einfluss der Array-Geometrie auf die Eigenschaften des CTC-Systems. So zeigt sich, dass bei der Verwendung weniger Lautsprecher auf Grund der sinkenden Spatial Aliasing Frequency (vgl. [1]) die Sweet-Spots in höheren Frequenzbereichen deutlich verkleinert werden. Wird dagegen das Lautsprecherarray verbreitert oder verkürzt, hat dies einen direkten Einfluss auf die untere Grenzfrequenz der Kanaltrennung des CTC-Systems. Außerdem zeigten die Untersuchungen, dass auch andere WFS Lautsprecheranordnungen, wie beispielsweise Kreis- oder Halbkreis-Arrays mit ähnlich guten Ergebnissen verwendet werden können. Durch diese freien Parameter ist es daher möglich, das Gesamtsystem auf die jeweiligen Anforderungen und Gegebenheiten anzupassen.

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung konnte bestätigt werden, dass sich typische Filter für die Crosstalk-Cancellation bei Nutzung durch mehrere Zuhörer nur sehr begrenzt eignen. Stattdessen zeigte sich eine Kombination von CTC und Wellenfeldsynthese als vielversprechendste Variante für diesen Anwendungsfall. In weiteren Untersuchungen sollte gezeigt werden, ob sich auch noch weitere Vorteile des Szenarios mit einem Zuhörer aus [4] auf die Mehrbenutzervariante übertragen lassen.

## Literatur

- [1] Jens Ahrens, Rudolph Rabenstein, and Sascha Spors. The theory of wave field synthesis revisited. In *Audio Engineering Society Convention 124*, 5 2008.
- [2] Jerry Bauck and Duane H. Cooper. Generalized transaural stereo and applications. *Journal Of The Audio Engineering Society*, 44(9), September 1996.
- [3] Yesenia Lacouture Parodi. *A systematic study of binaural reproduction systems through loudspeakers*. Section of Acoustics, Aalborg University, 2010.
- [4] Daniel Menzel, Helmut Wittek, Günther Theile, and Hugo Fastl. The binaural sky: A virtual headphone for binaural room synthesis. In *Tonmeistersymposium*, 2005.