

# Realisierung eines Echtzeit-Systems zur Nachführung der Übersprechkompensation für einen bewegten Zuhörer

Tobias Lentz, Oliver Schmitz, Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen

tobias.lentz@akustik.rwth-aachen.de

## 1. Einleitung

Räumliches Hören gründet sich auf der Tatsache, dass das Schallfeld binaural ausgewertet wird.

Ein binaurales (zweikanaliges, kopfbezogenes) Signal repräsentiert das Schallfeld am Eingang der beiden Ohrkanäle und beinhaltet zeitliche und spektrale Merkmale, die eine Lokalisation der Quelle im Raum ermöglichen [1]. Ein solches Schallfeld ist z.B. mit Sondenmikrofonen oder einem Kunstkopf ohne großen Aufwand aufzunehmen. Die Wiedergabe bereitet allerdings immer noch Schwierigkeiten. Das Hauptproblem besteht darin, ein binaurales Signal auch exakt am Eingang der Gehörgänge zu reproduzieren, so dass ein natürlicher Höreindruck entsteht.

Eine Wiedergabe über Kopfhörer erfüllt vom technischen Aspekt wie Frequenzgang und Kanaltrennung zwar am ehesten die Bedingungen, erreicht jedoch in der subjektiven Wahrnehmung vieler Hörer oftmals nicht das gewünschte Ergebnis. Es tritt hier oft eine „Im Kopf Lokalisation“ auf, deren Entstehung noch nicht vollständig geklärt ist. Zudem bewirken Kopfhörer eine unnatürliche Situation, da sie das Ohr abdecken und so den Eindruck mindern, dass es sich um ein Schallsignal handelt, welches von einer realen Quelle im Raum stammt. Aus diesen Gründen wird eine Wiedergabe über Lautsprecher angestrebt.

## 2. Übersprechkompensation

Bei einer herkömmlichen Lautsprecherwiedergabe kommt es jedoch zu einem gerade hier unerwünschten Übersprechen der Kanäle, welches den dreidimensionalen Höreindruck zunichte macht.

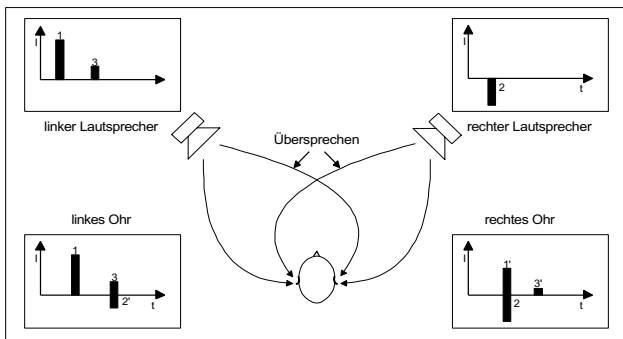


Abb. 1: Übersprechen der Kanäle bei Abstrahlung eines Impulses über den linken Lautsprecher (1) und die ersten Kompensationsschritte (2, 3).

Die Übertragungswege müssten derart entzerrt sein, dass das Signal für das linke Ohr auch nur im linken Ohr und das Signal für das rechte Ohr nur im rechten Ohr zu hören ist. Nur so ist eine ausreichende Kanaltrennung gegeben. Dieses ist bereits möglich und wird als Übersprechkompensation bezeichnet [2,3,4]. Die Kompensation gilt allerdings nur für die Position, bei der die Übertragungswege gemessen und die entsprechenden Filter berechnet wurden. Hier liegt der große Nachteil: man kann sich nicht frei bewegen, was die Anwendbarkeit stark einschränkt. Das vorrangige Ziel dieser Arbeit ist, ein System zu realisieren, das eine Bewegung in einem größeren Raumbereich möglich macht (dynamische Übersprechkompensation).

## 3. Dynamische Kompensation

Die Erweiterung auf einen größeren Raumbereich macht es erforderlich, die Kompensationsfilter an die momentane Kopfposition der Abhörperson anzupassen. Das System muss also in der Lage sein die Kopfposition auszuwerten, die Filter bereitzustellen und die eigentliche Filterung des Signals durchzuführen. Hierfür wird ein PC-System verwendet, an dem über die serielle Schnittstelle ein Headtracking-System angeschlossen ist, welches fortlaufend die aktuelle Position des Hörers bestimmt.

Grundsätzlich ist es möglich, Kompensationsfilter für ein festes Raster im Vorfeld zu berechnen und zur Laufzeit lediglich das korrekte Filter auszuwählen. Aus speicherplatztechnischen Gründen ist es jedoch günstiger, die Informationen, die für die Filterberechnung erforderlich sind, zu speichern, nicht die Filter selber. Nachteil dieser Methode ist sicherlich der wesentlich höhere Rechenaufwand, der jedoch mit aktuellen Prozessoren bewältigt werden kann. Mit einem 1GHz PIII Prozessor liegt die gesamte Latenz des Systems bei ca. 20 ms, so dass eine Echtzeitanwendung möglich ist.

## 4. HRTFs als Grundlage der Übersprechkompensation

Die vier Übertragungswege in Abb. 1 repräsentieren nichts anderes als zwei Sätze HRTFs (Head Related Transfer Functions) unterschiedlicher Richtung. Der Abstand des Lautsprechers zum Kopf wirkt sich in der Laufzeit und im Pegel der einzelnen HRTFs aus. Die Laufzeit lässt sich über die Schallgeschwindigkeit einfach berechnen, und es ist möglich, diese im Nachhinein anzupassen. Damit kann die Einbeziehung der Abstandsabhängigkeit im laufenden Programm erfolgen. Der Pegel lässt sich über das

Abstandsgesetz  $p \sim 1/r$  anpassen. In dem hier vorgestellten System kommt eine Datenbank, welche die HRTFs des ITA-Kunstkopfes in einer Auflösung von  $1^\circ$  für Azimuth und Elevation enthält, zum Einsatz.

Zur Beurteilung, bei welcher Abweichung aus der Idealposition ein neuer Filtersatz benötigt wird, wurde im Vorfeld die Ausdehnung des „Sweet-Spots“ untersucht. Dieser gibt den maximalen Bereich um den Punkt an, für den der Filtersatz berechnet wurde, ohne dass die Abhörperson eine Änderung der Lokalisation oder Klangfarbe des Signals wahrnimmt [5]. Im vorliegenden System werden folgende Werte verwendet:

$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta \varphi$	$\Delta \vartheta$	$\Delta \rho$
Vorne/ Hinten	Seite	Oben/ Unten	Azimuth	Elevation	Rotation
3 cm	1 cm	3 cm	$1^\circ$	$3^\circ$	$3^\circ$

Tab. 1: Gültigkeitsbereich eines Filtersatzes für jeden Freiheitsgrad.

Bei den gewählten Grenzen für die Abweichung kann es vorkommen, dass die benötigte HRTF nicht in der Datenbank vorhanden ist, also zwischen zwei Vollgradschritten liegt. In diesem Fall wird aus den nächsten Gradschritt gerundet und die entsprechende HRTF geladen. Pegel und Laufzeit werden allerdings exakt für die Position angeglichen. Vergleiche von zwei um ein Grad versetzte HRTFs zeigen im Spektrum nur geringe Unterschiede, der Laufzeitbezug ist jedoch gerade für die zu erzielende Kanaltrennung extrem wichtig.

Da eine reale Kopfbewegung in der Regel nicht ausschließlich einen Freiheitsgrad beinhaltet, wertet das System die Summe aller Abweichungen aus und veranlasst bei Überschreitung der Schwelle die Berechnung eines neuen Filtersatzes.

$$s = \left( \frac{|x_n - x_a|}{\Delta x} + \frac{|y_n - y_a|}{\Delta y} + \frac{|z_n - z_a|}{\Delta z} + \frac{|\varphi_n - \varphi_a|}{\Delta \varphi} + \frac{|\vartheta_n - \vartheta_a|}{\Delta \vartheta} + \frac{|\rho_n - \rho_a|}{\Delta \rho} \right) \geq 1$$

n = neuer Wert, a = alter Wert

## 5. Messung der Kanaltrennung

Die Kanaltrennung wurde mit dem ITA-Kunstkopf, der in diesem Fall den Headtracker trägt, ermittelt. Der rechte Eingangskanal des Systems ist während der Messung stumm geschaltet. Aus der Pegeldifferenz der beiden Ohrsignale ergibt sich die erzielte Kanaltrennung. Zur besseren Darstellung sind dabei beide Ohrsignale auf das linke Ohr bezogen. So kann man direkt die Kanaltrennung ablesen. Der von den Wiedergabelautsprechern aufgespannte Winkel begrenzt den Gültigkeitsbereich der Kompensation. Bei frontalem Schalleinfall besteht bei zweien der vier Übertragungswege kein interauraler Laufzeitunterschied und macht eine ausreichende Kompensation nicht mehr möglich.

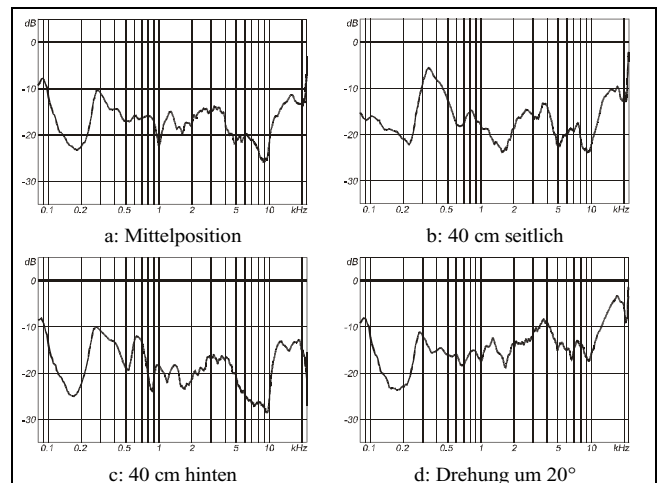


Abb. 2: Kanaltrennung für unterschiedliche Positionen bzw. Orientierung.

## 6. Zusammenfassung

Ausgehend von der statischen Übersprechkompensation für einen Punkt wurde ein System implementiert, welches die Kompensation in einem größeren Raumbereich ermöglicht. Die Filtersätze werden dabei entsprechend der geforderten Position zur Laufzeit berechnet. Als Grundlage dient eine HRTF-Datenbank, welche die bei der statischen Übersprechkompensation notwendigen Messungen der Übertragungsfunktionen für die jeweilige Position ersetzt.

Die vorläufigen Hörtests haben gezeigt, dass die dynamische Übersprechkompensation in einer reflexionsarmen Testumgebung mit zwei Lautsprechern sehr vielversprechend ist. Eine Bewegung des Zuhörers ist in einem Bereich von ca.  $1 \text{ m}^2$ , die Drehung des Kopfes innerhalb des von den Lautsprechern aufgespannten Winkels möglich, wobei die Wiedergabequalität sehr hoch ist. Die Möglichkeit, eine komplette Drehung auszuführen, erreicht man durch eine Erweiterung auf vier Wiedergabelautsprecher.

## 7. Literatur

- [1] Blauert, J.: *Räumliches Hören*, Hirzelverlag, Stuttgart (1974).
- [2] Atal, B.S., Schröder, M.R.: *Journal of the Audio Engineering Society*, (1967).
- [3] Møller, H.: *Reproduction of artificial head recordings through loudspeakers.*, *Journal of the Audio Engineering Society*. 37 (1989).
- [4] Schmitz, A.: *Naturgetreue Wiedergabe kopfbezogener Schallaufnahmen über zwei Lautsprecher mit Hilfe eines Übersprechkompensators.*, Dissertation, Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen (1993).
- [5] Amate, J.: *Investigation of parameters for dynamic crosstalk cancellation.*, Diplomarbeit, Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen (2000).