

# Analyse räumlicher Schallfelder mit einem binauralen Modell

Jeroen Breebaart (1) und Armin Kohlrausch (1,2)

(1) Philips Research Laboratories Eindhoven, Prof. Holstlaan 4, NL-5656 AA Eindhoven, Niederlande und

(2) Department of Technology Management, TU Eindhoven, P.O. Box 513, NL-5600 MB Eindhoven, Niederlande

## Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Analyse der Wahrnehmung räumlicher Schallfelder, wie sie durch Wiedergabe über Stereolautsprecher in einer echofreien Umgebung erzeugt werden. Hierbei vergleichen wir Phantomschallquellen, die durch Intensitätsunterschiede zwischen rechtem und linkem Lautsprechersignal hervorgerufen werden (Intensitätsstereophonie), mit 'echten' Schallquellen am Ort der Phantomschallquelle. In der Analyse werden die vier richtungsabhängigen Übertragungsfunktionen zwischen den beiden Lautsprechern und den beiden Ohren sowie die periphere Signalverarbeitung im Gehör berücksichtigt. Die entstehenden Schallfelder werden in Hinblick auf die (frequenzabhängigen) interauralen Zeit- und Pegelunterschiede und spektralen Verfärbungen untersucht. Für Hörerpositionen außerhalb des Sweetspots treten, aufgrund des unterschiedlichen Abstandes zu den beiden Lautsprechern, zusätzliche Laufzeit- und Pegelunterschiede auf, die das wahrgenommene Stereobild in Richtung eines der beiden Lautsprecher verschieben. In dieser Hörsituation muss, neben den interauralen Unterschieden, auch der Präzedenzeffekt in der Analyse berücksichtigt werden.

## Einleitung

Schallwiedergabe über zwei Lautsprecher ist wahrscheinlich die am weitesten verbreitete Art der Musikdarbietung. Mithilfe entsprechender Aufnahmetechniken ist es möglich, bei Wiedergabe über zwei Lautsprecher Phantomschallquellen im gesamten Raum zwischen den beiden Lautsprechern zu erzeugen. Bei der Intensitätsstereophonie wird die räumliche Information in der Form von Pegelunterschieden zwischen den beiden Kanälen kodiert. Wird von zwei Lautsprechern dasselbe Signal mit einer Pegeldifferenz zwischen den beiden Kanälen abgestrahlt, ist für niedrige Frequenzen unterhalb von ca. 1 kHz der Gesamtpegel am rechten und am linken Ohr nahezu identisch, da der Kopf in diesem Frequenzbereich beinahe keinen akustischen Schatten erzeugt. Da aber an jedem Ohr die Signale vom rechten und linken Lautsprecher eintreffen, ergeben sich durch diese Überlagerung interaurale Phasenunterschiede (siehe z.B. Lipshitz, 1986; Blauert, 1997, S. 214). Das heißt, dass bei niedrigen Frequenzen interaurale Pegeldifferenzen bei Lautsprecherwiedergabe in interaurale Zeitunterschiede umgewandelt werden. Bei hohen Frequenzen ergeben sich dagegen deutliche Abschattungseffekte durch den Kopf und damit interaurale Pegelunterschiede zwischen den Signalen am rechten und linken Ohr.

Dieses Wiedergabeverfahren funktioniert allerdings nicht außerhalb des sweet spots, also auf Positionen, an denen der Abstand zu den beiden Lautsprechern unterschiedlich wird. Hier bricht das räumliche Schallbild zusammen und der Schall scheint aus dem Lautsprecher mit dem geringeren Abstand zu kommen. In unserem Beitrag wollen wir mit Hilfe eines psychoakustischen Modells Phantom- und echte Schallquellen sowohl für ideale wie auch nichtideale Hörpositionen miteinander vergleichen.

## Modell

Die räumliche Ausgangsposition für die Modellrechnungen war eine Standardstereoanordnung zweier Lautsprecher mit einem Abstand von 2,5 m. Die ideale Hörposition (sweet spot) bildet mit diesen Lautsprechern ein gleichseitiges Dreieck. Zur Berechnung der Übertragungsfunktionen zwischen den beiden Lautsprechern und den beiden Ohren wurden Head Related Transfer Functions von der AUDIS CDROM (Blauert et al., 1998) verwendet, und zusätzlich wurde die Abschwächung und die Laufzeitverzögerung aufgrund des jeweiligen Lautsprecherabstandes berücksichtigt. Phantomschallquellen wurden mit Hilfe einer relativen Pegelgewichtung zwischen den beiden Lautsprechern positioniert. Hierfür wurde die von Blumlein vorgeschlagene Gewichtung verwendet:  $\theta = \arcsin\left(\frac{\alpha-1}{\alpha+1}\sin\theta_0\right)$ . Hierbei bezeichnet  $\theta_0$  den Öffnungswinkel der Lautsprecheraufstellung (hier 30 Grad),  $\alpha$  ist das Amplitudenverhältnis zwischen rechtem und linkem Kanal, und  $\theta$  ist der Winkel der Phantomschallquelle.

Der Präzedenzeffekt kommt bei diesem Aufbau ins Spiel, wenn der Hörer sich seitlich aus dem sweet spot herausbewegt, da hierbei Laufzeitunterschiede zwischen den beiden Lautsprechersignalen von einigen Millisekunden auftreten. In einem solchen Fall wird die Richtungswahrnehmung für das Gesamthörereignis vom zuerst ankommenden Schall dominiert (siehe z.B. Litovsky et al., 1999, für einen aktuellen Übersichtsartikel). Dieses Phänomen wurde durch eine Gewichtungsfunktion berücksichtigt, die den direkten und den verzögerten Schall mit einer relativen Gewichtung addiert (Shinn-Cunningham et al., 1993). Für Verzögerungen zwischen 0 und 2 ms veränderte sich das relative Gewicht linear von 1:1 zu 4:1, und blieb auf diesem Wert für größere Verzögerungen. Diese Gewichtung wurde nur zur Berechnung der interauralen Zeit- und Intensitätsunterschiede verwendet, nicht aber bei der Berechnung der Klangverfärbung.

Aus den am rechten und linken Ohr empfangenen Signalen wurden mit Hilfe einer linearen Gammatone Filterbank Erregungspegelmuster berechnet, aus denen sich die frequenzabhängigen interauralen Pegeldifferenzen direkt ableiten lassen. Zur Beurteilung der Klangverfärbung wurde aus diesen Mustern durch nichtlineare Kombination ein über das rechte und das linke Ohr gemitteltetes Erregungspegelmuster berechnet (Zurek, 1979). Frequenzabhängige interaurale Zeitunterschiede wurden durch Bestimmung des Maximums in der interauralen Kreuzkorrelation der Ausgänge der Filterbank berechnet. Bei diesem Rechenschritt wurde durch eine Kombination von Gleichrichter und Tiefpassfilter der Verlust der Phaseninformation oberhalb ca. 1 kHz berücksichtigt.

## Modellberechnungen, Hörposition im sweet spot

In Figur 1 zeigen die beiden linken Graphen die Ergebnisse für eine Phantomquelle, die beiden rechten die für eine 'echte' Schallquelle. Die beiden oberen Graphen zeigen die interauralen Intensitätsunterschiede, die beiden unteren

die interauralen Zeitunterschiede, jeweils als Funktion der Richtung (x-Achse) sowie der Frequenz in ERB (y-Achse). Der Vergleich macht zwei Dinge deutlich. Die Muster sind für die beiden verschiedenen Formen der Schallanbietung sehr ähnlich (Vergleich rechts-links). Weiterhin zeigt sich, dass im tieffrequenten Bereich unterhalb von ca. 800 Hz (ERB Wert von 13) bei der Intensitätsstereophonie praktisch keine interauralen Pegelunterschiede vorhanden sind, und dass die interauralen Zeitunterschiede gut mit denen einer realen Schallquelle übereinstimmen.

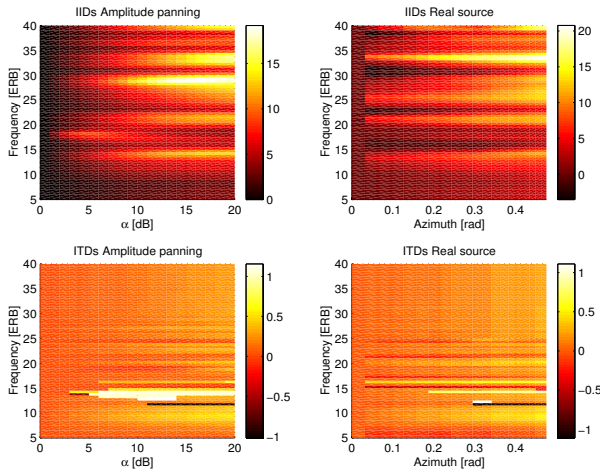


Abb. 1: Frequenzabhängige interaurale Intensitäts- (oben, in dB) und Zeitunterschiede (unten, in ms) für eine reale (rechts) und eine Phantomschallquelle (links) als Funktion der Schallquellenrichtung.

In Abbildung 2 ist die spektrale Verfärbung zu sehen, die aus dem Vergleich der Erregungspegelmuster für Phantom- und reale Schallquellen berechnet wurde. Deutlich zeigt sich, dass bei einem ERB Wert von etwa 18 (ca. 1800 Hz) die Phantomschallquelle einen um mehr als 5 dB niedrigeren Spektralwert besitzt, und dass dieser Unterschied für einen großen Winkelbereich dominant sichtbar bleibt. Diese Pegelabsenkung ergibt sich, als Kammfiltereffekt, aus den Laufzeitunterschieden der Signale von den beiden Lautsprechern (vergl. Pulkki, 2001).

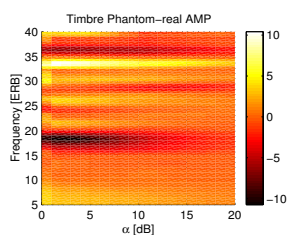


Abb. 2: Unterschiede in den spektralen Erregungspegelmustern (in dB) für eine Phantom- und eine echte Schallquelle als Funktion der Schallquellenrichtung.

### Modellberechnungen, Hörpositionen außerhalb des sweet spot

Bei Hörpositionen, die gegenüber der Referenzposition seitlich verschoben sind, treten zusätzlich zu den oben genannten Effekten auch größere Laufzeitunterschiede zwischen den beiden Lautsprechersignalen auf. Da durch den Präzedenzeffekt die Richtung des zuerst ankommenden Signals besonders betont wird, ergibt sich eine starke Verschiebung der Lokalisation in Richtung auf den näheren Lautsprecher. Im linken Teil der Abbildung 3 sind die interauralen Pegelunterschiede als Funktion der seitlichen Verschiebung (Abszisse) sowie der Frequenz (Ordinate) für eine Phantomschallquelle aufgetragen. Diese Quelle befand

sich jeweils in der Mitte zwischen den beiden Stereolautsprechern (seitliche Position von 0 m) und der Kopf des Hörers war immer auf die Schallquelle hin orientiert, so dass sich für den Vergleichsfall einer realen Schallquelle keinerlei interaurale Unterschiede ergeben. Bei der Phantomschallquelle treten bereits ab einer seitlichen Verschiebung von ca. 20 cm deutliche interaurale Pegelunterschiede auf, die mit wachsender seitlicher Position größer werden und von Kammfiltereffekten überlagert werden. Der rechte Teil dieses Bildes zeigt entsprechende Daten für die interauralen Zeitunterschiede, die hier sowohl als Funktion der x wie der y-Richtung (Abstand von den Lautsprechern) berechnet wurden. Auch hier treten ab etwas 20 cm seitlicher Auslenkung deutliche interaurale Unterschiede auf, die die Phantomschallquelle in Richtung des näheren Lautsprechers verschieben. Diese Unterschiede werden mit abnehmendem Abstand zu den Lautsprechern größer.

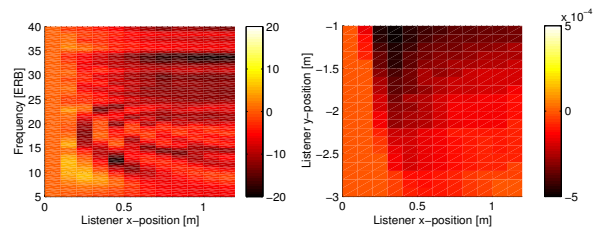


Abb. 3 Interaurale Intensitäts- (links, in dB) sowie Zeitunterschiede (rechts, in s) für verschiedene seitliche Ausrichtungen der Hörposition.

### Zusammenfassung

Die Analyse mit einem binauralen Modell unterstützt die Hörerfahrung in räumlichen Schallfeldern. Das Modell ist in der Lage, sowohl (monaurale) Klangverfärbungen als auch die frequenzabhängige Veränderung interauraler Unterschiede anzugeben. Es bietet daher eine gute Grundlage, um durch Lautsprecherwiedergabe erzeugte räumliche Schallfelder zu analysieren, wobei allerdings zu beachten ist, dass wir uns in diesem Beitrag auf die Analyse nachhallfreier Situationen beschränkt haben.

### Literatur

- Blauert, J. (1997). *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Blauert, J., Brüggemann, M., Hartung, K., Bronkhorst, A.W., Drullmann, R., Reynaud, G., Pellieux, L., Krebber, W., Sottek, R. (1998). The AUDIS catalog of human HRTFs. In *Proc. 16th Int. Congr. Acoust.* ICA, Inst. of Physics, USA-NY, CD-ROM.
- Lipshitz, S.P. (1986). Stereo microphone techniques: are the purists wrong? *J. Audio Eng. Soc.* **34**, 716–744.
- Litovsky, R.Y., Colburn, H.S., Yost, W.A., Guzman, S.J. (1999). The precedence effect. *J. Acoust. Soc. Am.* **106**, 1633–1654.
- Pulkki, V. (2001). Coloration of amplitude-panned virtual sources. In *Proceedings of the 110th Convention of the Audio Engineering Society*, Amsterdam, The Netherlands, preprint nr. 5402.
- Shinn-Cunningham, B.G., Zurek, P.M., Durlach, N.I. (1993). Adjustment and discrimination measurements of the precedence effect. *J. Acoust. Soc. Am.* **93**, 2923–2932.
- Zurek, P.M. (1979). Measurements of binaural echo suppression. *J. Acoust. Soc. Am.* **66**, 1750–1757.