

# System zur Erzeugung von vorgebbaren Hörereignisorten

F. Haferkorn, W.Schmid

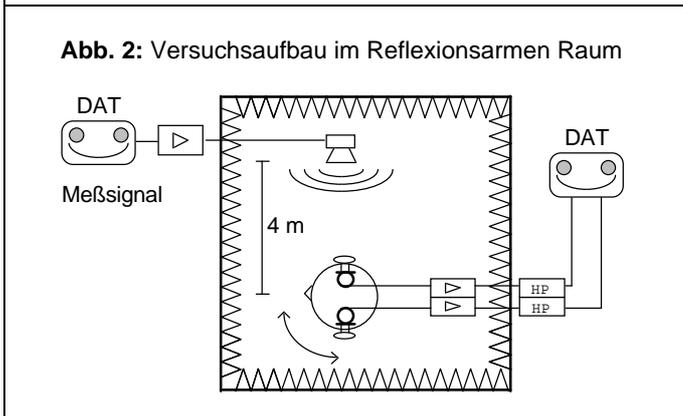
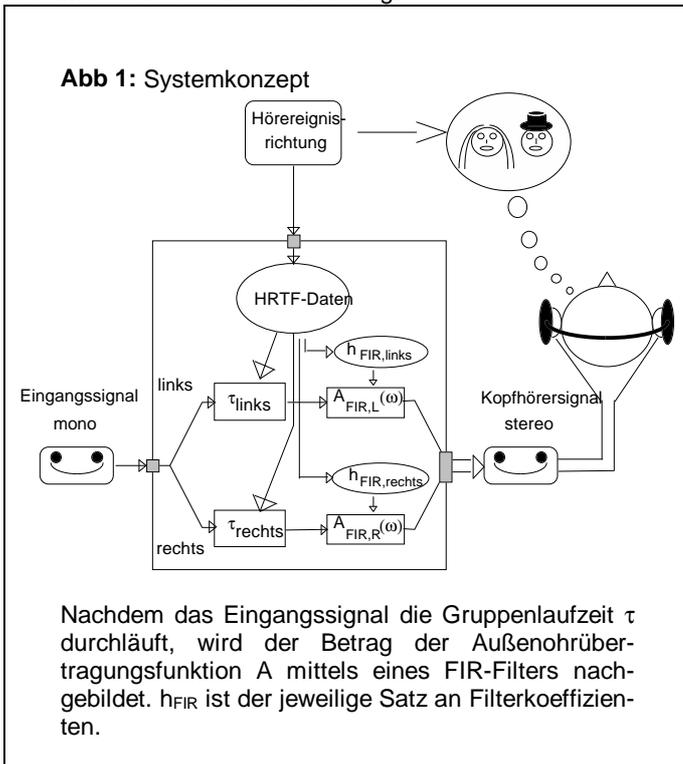
Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, TU München

## Einführung

Die Fähigkeit des Gehörs, einzelne Schallquellen zu lokalisieren, ist seit langem bekannt. Das Gehör ist sowohl in der Lage, einer Schallquelle im Falle einer Live-Darbietung Richtungsinformationen zuzuordnen, als auch beim Hören sogenannter Kunstkopfaufnahmen dem Hörereignis recht genau einen Hörereignisort zuzuordnen. Im folgenden wird ein System vorgestellt, welches erlaubt, die einkanalige Aufzeichnung eines Schallereignisses so zu bearbeiten, daß beim Anhören über Kopfhörer ein wählbarer Hörereignisort erzeugt wird.

## Konzept des Systems

Wie in Abb. 1 dargestellt wird das Eingangssignal mit der Impulsantwort der Außenohrübertragungsfunktion (head related transfer function oder kurz HRTF) gefaltet. Die Faltung wird für beide Kanäle reduziert auf je ein Gruppenlaufzeitglied und je ein FIR-Filter zur Nachbildung von Betrag und Phase der Außenohrübertragungsfunktion. Um das Signal für die linke Kopfhörermuschel zu berechnen, werden die Daten des linken Ohres verwendet. Das Signal für die rechte Kopfhörermuschel errechnet sich analog.



## Messung der Außenohrübertragungsfunktion

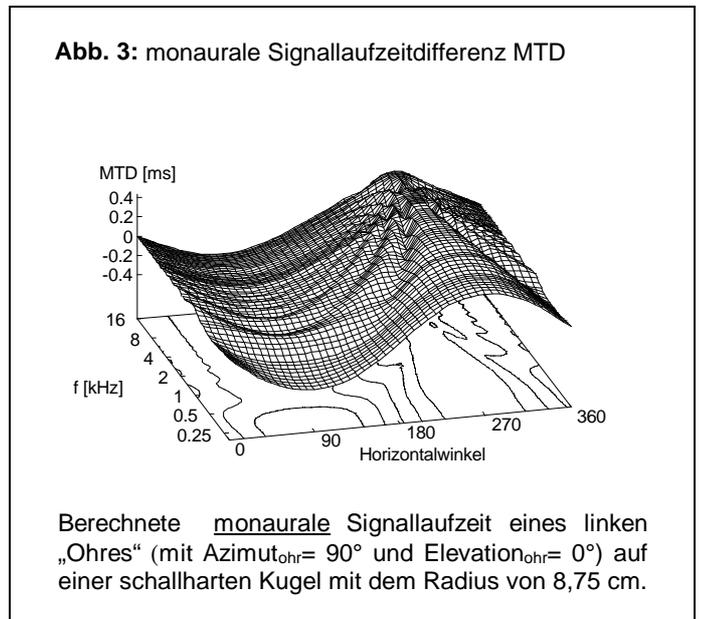
Anhand eines Kunstkopfes ( Neumann KU80 ) wurde eine repräsentative Außenohrübertragungsfunktion ausgemessen. Dazu wurde der Kunstkopf drehbar gelagert und für verschiedene Richtungen mit quasistatischen Meßsignalen verschiedener Frequenz beschallt. Die quasistatischen Meßsignale sind gaußmodulierte Sinustöne mit der interessierenden Trägerfrequenz  $f$ . Die Messungen wurden im Frequenzbereich von 200Hz bis 16kHz durchgeführt.

## Ermittlung der Phaseninformation

Analog zu KUHN 1977 wurde die Druckübertragungsfunktion einer schallharten Kugel berechnet. Damit ergab sich mit der Formel für die Gruppenlaufzeit

$$\tau_{gr,calc} = \frac{d}{d\omega} \arg(\underline{A}_{calc})$$

die in Abb. 3 dargestellte Abhängigkeit der monauralen Signallaufzeit (monaural time difference MTD) von der Schalleinfallrichtung und der Frequenz  $f$ :



Die Phaseninformation (Abbildung 3) und der Betrag der gemessenen Außenohrübertragungsfunktion ermöglichen zusammen die Anpassung der FIR-Filterkoeffizienten und die Bestimmung der Gruppenlaufzeitglieder

## Hörversuche

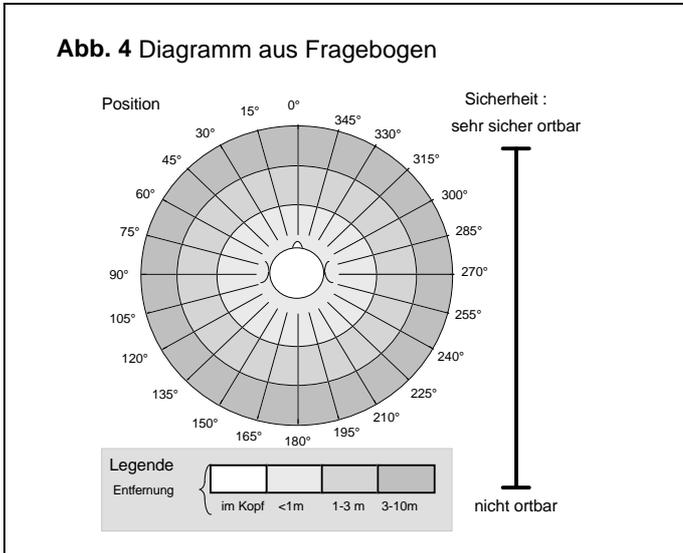
Zur Verifikation des Systems wurden Hörversuche durchgeführt. Dazu wurde ein FIR-Filter 16. Ordnung verwendet. Bei dieser Ordnung sinkt die mittlere Abweichung in Dezibel zwischen der gemessenen und der synthetischen Außenohrübertragungsfunktion auf ca. 1,2 dB ab.

Die Versuchspersonen bekamen die Aufgabe, auf einem Diagramm (Abb.4) die Hörereignisrichtung und die Hörereignisentfernung anzugeben. Weiterhin war noch nach der Sicherheit der Beurteilung gefragt.

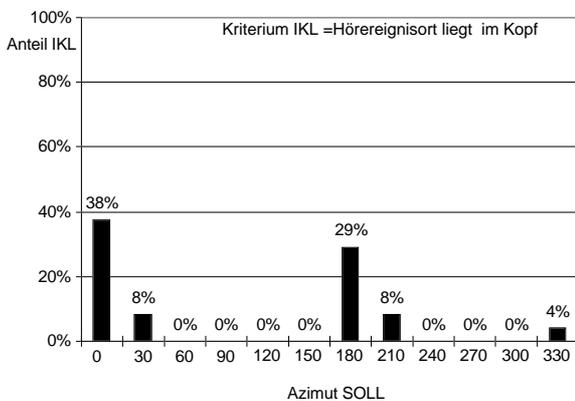
## Ergebnisse

Die Abbildung der vorgegebenen Hörereignisorte auf die wahrgenommenen Hörereignisorte ist für Richtungen außerhalb der Medianebene gut gelungen.

Dies zeigt sich z.B. in der Sicherheit der Beurteilung. Diese war für Richtungen außerhalb der Medianebene immer im oberen Anteil der Linienlänge in der Nähe von „sehr sicher ortbar“. Für Richtungen innerhalb der Medianebene, also für den Fall, daß keine auswertbare interaurale Signallaufzeit auftritt, gibt es einen erhöhten Anteil (bis zu 38%) an Im-Kopf-Lokalisation und die Sicherheit der Beurteilung ist schlechter.



**Abb. 5 Anteil an Im-Kopf-Lokalisation [ % ]**

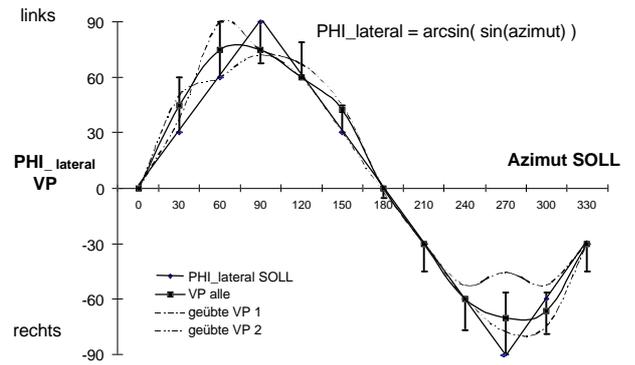


Anteil der Testschalle, die einen Hörereignisort innerhalb des Kopfes bewirken. Nur für Richtungen innerhalb oder nahe bei der Medianebene treten Im-Kopf-Lokalisationen auf. Bei diesen Richtungen enthält das binaurale Signal keine interauralen Signallaufzeiten.

Als Maß für die seitliche Auslenkung wurde der von der Versuchsperson wahrgenommene Horizontalwinkel mittels der Funktion  $\arcsin(\sin(\text{Azimut VP}))$  auf die vordere Halbebene abgebildet. In Abbildung 6 entspricht die „Dreieckswelle“ dem Sollwert. Die Verhältnisse die mittels des Systems zur Erzeugung von vorgebbaren Hörereignisorten erzeugt werden konnten, stimmen bezüglich der seitlichen Auslenkung gut mit den Sollwerten überein.

Als Abweichung ist lediglich eine geringe Stauchung der Richtungen in der Nähe der Richtungen „ganz rechts“ und „ganz links“ aufgetreten.

**Abb. 6 : Maß für die seitliche Auslenkung**

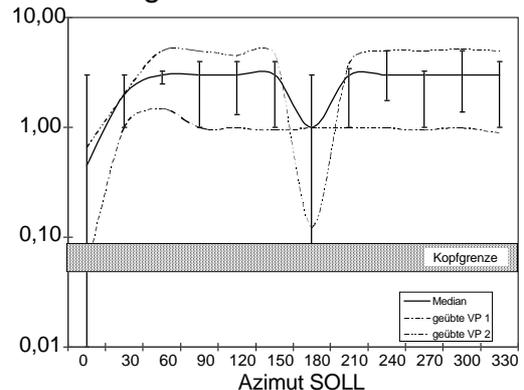


Seitliche Auslenkung aller vorliegenden Hörereignisrichtungen, erzeugt durch Spiegelung der hinteren Halbebene in die vordere Halbebene durch die Formel  $\arcsin(\sin(\text{Horizontalwinkel}))$

Die Beurteilung der Hörereignisentfernung zeigt, daß die Versuchspersonen die Hörereignisorte weit außerhalb des Kopfes lokalisierten. Der Schall wurde für Richtungen Außerhalb der Medianebene ca. 3 Meter vom Kopf entfernt wahrgenommen. Innerhalb der Medianebene trat für bis zu 38% der Testschalle eine Im-Kopf-Lokalisation auf. Deshalb ist der untere Interquartilbereich in der Nähe des Kopfradius. Der Medianwert liegt jedoch weit außerhalb des Kopfes.

**Abb. 7 : Hörereignisentfernung in Metern**

### Entfernung in Metern



### Echtzeitverhalten

Auf einem PC mit einer 486-DX33 und 33 Mhz Taktfrequenz war es nicht möglich die Ausgangssignale in Echtzeit zu berechnen. Die Berechnung der Ausgangssignale benötigte bei verwendung eines FIR-Filter 16. Ordnung (vgl. Hörversuche) und Laden/Speichern der Ein-/Ausgangssignale von der bzw. auf die Festplatte 7-mal länger als das Eingangssignal dauerte. Die Verarbeitung erfolgt also offline.

### Literatur

**KUHN 1977**, Kuhn George F.; „Model of the interaural time differences in the azimuthal plane“; J.A.S.A Vol 62 (Juli 1977) pp 157-167