

MESSUNG KOPFBEZOGENER RAUMAKUSTISCHER PARAMETER MIT MIKROPHONARRAYS

Jörg Becker, Matias de la Fuente und Markus Sapp

Institut für Elektrische Nachrichtentechnik, RWTH Aachen, 52056 Aachen, Germany

Tel: +49-241-807676; fax: +49-241-8888196

e-mail: akustik@ient.rwth-aachen.de

1 Einleitung

In der Raumakustik ist die Messung zahlreicher raumakustischer Parameter zur Erfassung der Akustik eines Saales üblich. Insbesondere zur Ermittlung der räumlichen Schallfeldeigenschaften wie ASW, LEV, Seitenschallgrad oder Raumeindrucksmaß sind Messungen mit Mikrofonen verschiedener Richtcharakteristik oder Messungen mit Kunstköpfen nötig. Das wiederholte Messen an einer Empfangsposition mit verschiedenen Empfängern stellt dabei eine nicht zu unterschätzende Vergrößerung des Meßaufwandes und eine Verlängerung der Meßzeit dar. Eine Vereinfachung des Meßverfahrens ist daher aus Zeit- und Kostengründen erwünscht. Mehrkanalige Mikrofonarrays bieten die Möglichkeit, sowohl raumakustische Parameter mit ungerichteten messenden Mikrofonen zu ermitteln, als auch Größen, welche Mikrophone mit Richtcharakteristik benötigen, zu bestimmen.

Dieser Beitrag befaßt sich mit der Messung von kopfbezogenen raumakustischen Parametern wie dem IACC mit Hilfe von Mikrofonarrays. Es wird ein neuer Optimierungsalgorithmus vorgestellt, der iterativ für eine vorgegebene Anzahl von Mikrofonen die optimale Position ermittelt. Als Eingangsdaten dienen hierbei entweder die für die Horizontalebene bestimmten, gleitend terzgemittelten Außenohrübertragungsfunktionen (HRTFs) eines Kunstkopfes oder auch HRTF-Messungen des oberen Halbraums bzw. falls vorhanden Messungen der HRTFs über die ganze Sphäre. Durch den Optimierungsalgorithmus wird die Geometrie des Arrays spezifisch an die HRTFs des jeweiligen Kunstkopfes angepaßt.

2 Ansatz und Algorithmus

Abbildung 1 zeigt den zur Erzeugung kopfbezogener Messung verwendeten Ansatz eines Mikrofonarrays. Den Mikrofonen an den Positionen x, y, z wird jeweils ein Filter nachgeschaltet. Die Summe der Filterausgänge bildet dann die Stoßantwort der kopfbezogenen Messung. Als zu bestimmende Variablen ergeben sich für diesen Ansatz:

1. die Position der Mikrophone in x,y,z ,
2. die Filterstoßantworten,
3. die Anzahl der Zweige

Zur besseren Veranschaulichung wird der Ansatz für die Horizontalebene erläutert. Eine Ausdehnung des Ansatzes auf die dritte Dimension ist durch Erweiterung des Datensatzes auf die volle Sphäre oder den oberen Halbraum möglich.

Zunächst muß die Position eines Mikrophones bestimmt werden. Dazu wird der Frequenzbereich (Terz) oder die Frequenz f_0 aus dem Datensatz ermittelt, bei der die Richtcharakteristik am wenigsten einer Kugelcharakteristik entspricht. Die Mikrofonübertragungsfunktion am Punkt x, y für einen Lautsprecher im Abstand r_d und unter dem Winkel φ vom Ursprung des Koordinatensystemes ergibt sich :

$$M(f, \varphi, x, y) = M_0(f) \cdot e^{-j \cdot k(r_d + x \cdot \sin(\varphi) + y \cdot \cos(\varphi))} \quad (1)$$

Der Betrag der Mikrofonübertragungsfunktionen M_0 soll im weiteren konstant zu 1 angenommen werden. Für jede Position x, y werden in einem Quadrat von 25 x 25 cm in einem 5mm Raster mit Hilfe der Mikrofonübertragungsfunktionen aus Gleichung 1 für alle Winkel φ des Datensatzes laufzeitkorrigierte Kopfübertragungsfunktionen bestimmt.

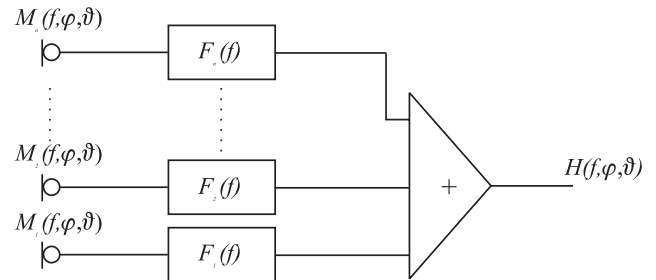


Abbildung 1: Mikrofonarray mit linearer Filterbank zur Simulation von Kunstkopfmessungen

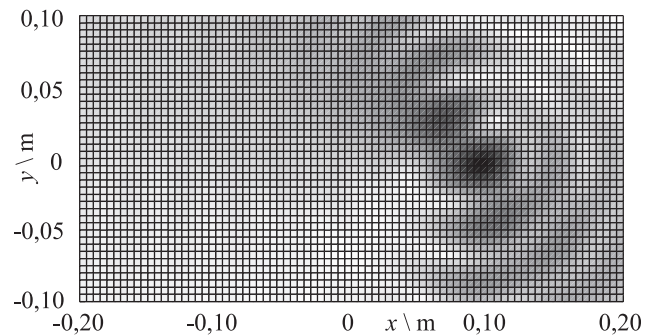


Abbildung 2: σ -Wert in Abhängigkeit von der Mikrofonposition x, y . Hell hohe Werte, dunkel geringe Werte

$$H_{kor}(f_0, \varphi, x, y) = \frac{H(f_0, \varphi)}{M(f_0, \varphi, x, y)} \quad (2)$$

Aus diesen laufzeitkorrigierten Übertragungsfunktionen wird eine mittlere komplexe Übertragungsfunktion über alle Einfallrichtungen gebildet. Die Phasen der Übertragungsfunktionen werden hierfür abgewickelt. Abbildung 2 zeigt die Abweichung σ der komplexen Mittelung von der Mittelung aller Beträge der HRTFs in der Horizontalebene für den Frequenzbereich f_0 . Wenn die Position des Mikrophones der des Ohres entspricht, so wird die Phase für den ausgewählten Frequenzbereich der laufzeitkorrigierten Übertragungsfunktionen annähernd zu Null und die komplexe Mittelung entspricht der Mittelung der Beträge. Die beste Position für das Mikrofon ist somit dort, wo σ minimal wird. Im weiteren soll diese Position mit x_0, y_0 bezeichnet werden.

$$\sigma(f_0, x, y) = \left| |H(f_0, \varphi)| - |H_{kor}(f_0, \varphi, x, y)| \right| \quad (3)$$

Nachdem nun die Mikrofonposition bestimmt wurde, kann die breitbandige Filterübertragungsfunktion mit Hilfe der Gleichung 4 durch Mittelung bestimmt werden.

Soll die Optimierung nicht nur für die Horizontalebene sondern für die Meßdaten um den ganzen Kopf herum erfolgen, so müssen die einzelnen HRTFs zusätzlich vor der Mittelung entsprechend dem ihnen zuge-

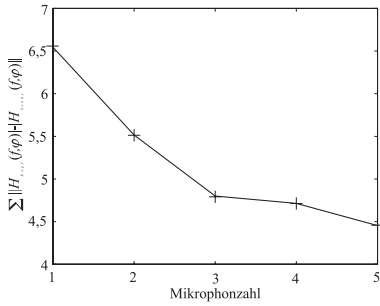


Abbildung 3: Summe der Abweichung des Betrages der Sondenmessung von Kunstkopfmessungen in der Horizontalebene in Abhängigkeit von der Mikrofonanzahl pro Ohr

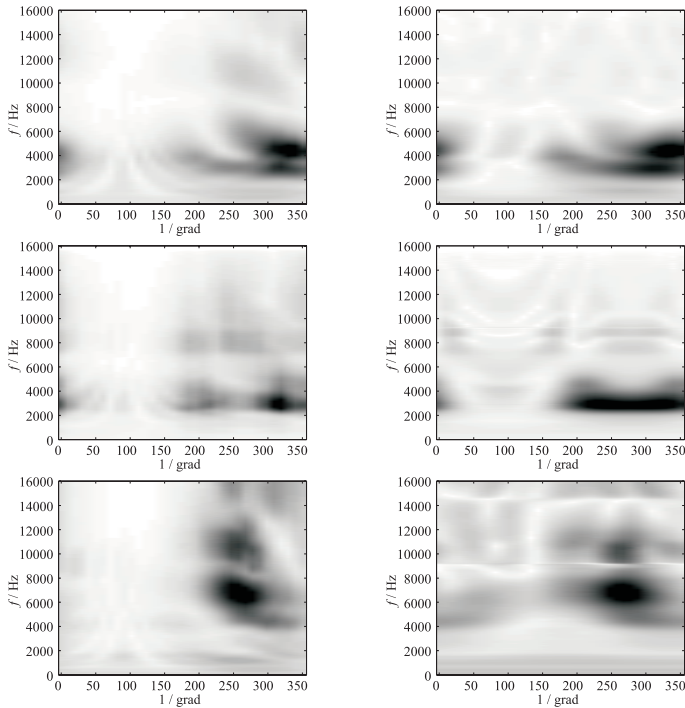


Abbildung 4: HRTFs für 3 Kunstköpfe Horizontalebene in 10°-Schritten (linkes Ohr): links Messung, rechts Simulation mit 3 Mikrofonen. Dunkel hoher Pegel (lineare Grauwertverteilung)

ordneten Raumwinkel gewichtet werden, so daß die Übertragungsfunktion $F_i(f)$ die eine um die Laufzeit im Punkt x_0, y_0 entzerrte Diffusfeldübertragungsfunktion des Kopfes beinhaltet.

$$F_i(f) = \frac{H(f, \varphi)}{M(f, \varphi, x_0, y_0)} \quad (4)$$

Zur Berechnung der Position und Filter für weitere Mikrofonzweige wird nun aus den Ausgangsdaten ein neuer Datensatz nach Gleichung 5 berechnet. Mit diesem Datensatz kann der Algorithmus erneut durchlaufen werden.

$$H_{neu}(f, \varphi) = H(f, \varphi) - F_i(f) \cdot M(f, \varphi, x_0, y_0) \quad (5)$$

Ein Maß für die Güte der Annäherung an die zu simulierenden Kunstkopfdaten ist die Summation aller Differenzen zwischen Betrag der Simulation und Betrag der Kunstkopfmessung für alle Frequenzen. Abbildung 3 zeigt diese Summe (200Hz - 10000kHz) in Abhängigkeit von der Mikrofonanzahl pro Ohr. Es zeigt sich, daß die Verbesserungen ab 3 Mikrofonen pro Ohr nur gering ausfallen, so daß im folgenden mit Arrays bestehend aus 6 Mikrofonen gearbeitet wurde.

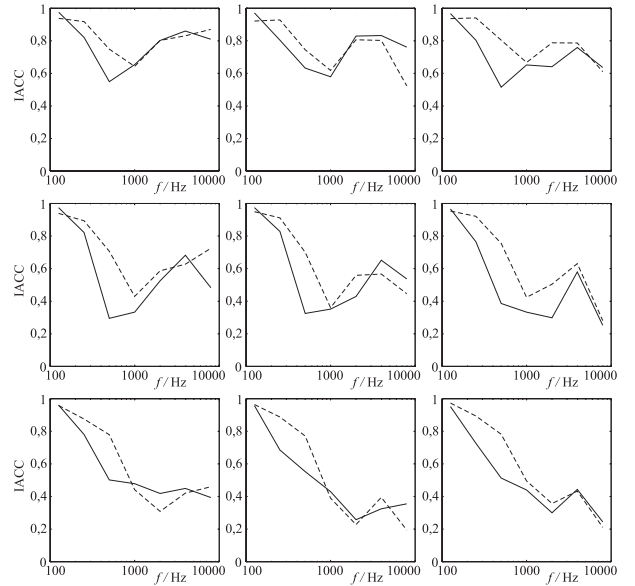


Abbildung 5: IACC gemessen mit 3 Kunstköpfen. Von oben nach unten 3m, 7m, 12m, Sender-Empfänger Distanz im Seminarraum des Institutes für Elektrische Nachrichtentechnik, von links nach rechts Kunstkopf A-C. Durchgezogen Kunstkopfmessung, gestrichelt Sondenmessung

3 Ergebnisse

Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der Sondenoptimierung für 3 verschiedene Kunstköpfe. Als Eingangsdaten dienen die gleitend terzgemittelten HRTFs der Horizontalebene (links). Die berechneten Übertragungsfunktionen der Sonde sind rechts dargestellt. Die Annäherung an die verschiedenen Kunstköpfe gelingt gut. Daß die Annäherungen auch zur Bestimmung raumakustischer Daten hinreichend ist, zeigt Abbildung 5. Es sind die Ergebnisse der IACC-Messungen für verschiedene Sender-Empfängerabstände (3m,7m,12m) im Seminarraum des Institutes für Elektrische Nachrichtentechnik dargestellt. Die Ergebnisse der Sondenmessung gestrichelt eingetragen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Algorithmus zur Berechnung von Filtern und Mikrofonpositionen für ein Mikrofonarray zur Erzeugung kopfbezogener Messungen wurde vorgestellt. Der Algorithmus wurde am Datensatz dreier verschiedener Kunstköpfe erprobt. Die Anzahl der für die Sonde benötigten Mikrophone liegt bei drei pro Ohr. Bei dreidimensionaler Erweiterung des Algorithmus werden mehr Mikrophone benötigt. Kopfbezogene Signale wurden aus den Sondenmessungen mit einem nachgeschaltetem DSP-System in Echtzeit errechnet. Aus diesen wurde dann als raumakustischer Parameter der IACC in Oktaven bestimmt. Die Abweichung der Sondenmessungen von den Kunstkopfmessungen ist z. T. geringer als die Abweichung der verschiedenen Kunstkopfmessungen untereinander. Erweitert man die Sonde zusätzlich mit einem Mikrofonpaar zur Seitenschallgradbestimmung, so lassen sich durch geeignete Nachverarbeitung alle bekannten raumakustischen Daten für eine Empfangsposition aus einer mehrkanaligen Messung gewinnen.

Literatur

- [1] M. Kleiner, "A new way of measuring the lateral energy fraction," *Applied Acoustics*, vol. 27, pp. 321–327, 1989.
- [2] V. Mellert and N. Tohtuyeva, "Ersatz der kopfbezogenen Schallfeldaufnahme durch eine Vielfach-Mikrofonanordnung," in *Fortschritte der Akustik, DAGA '98*, (Oldenburg), pp. 182–183, DEGA, 1998.
- [3] K. Genuit, *Ein Modell zur Beschreibung von Außenohrübertragungseigenschaften*. Dissertation, RWTH, Aachen, 1984.