

# Individualisierung der kopfbezogenen Übertragungsfunktion

Ramona Bomhardt<sup>1</sup>, Marcia Lins<sup>1</sup> und Janina Fels<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Technische Akustik, Juniorprofessur für Medizinische Akustik, RWTH Aachen,

<sup>2</sup>Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Neurowissenschaften und Medizin, Strukturelle und funktionelle Organisation des Gehirns (INM-1)

E-Mail: rbo@akustik.rwth-aachen.de

## Einleitung

Kopfbezogene Außenohrübertragungsfunktionen (engl. Head-Related Transfer Functions, HRTFs) werden seit längerem in der Akustik verwendet, um virtuelle Schallquellen räumlich wiederzugeben. Häufig werden HRTFs von Kunstköpfen verwendet, die allerdings nicht zwingend mit der HRTF des Probanden übereinstimmen.

Um den hohen messtechnischen Aufwand individueller HRTFs zu umgehen, wird in diesem Paper eine Individualisierung der Kunstkopf HRTFs angestrebt.

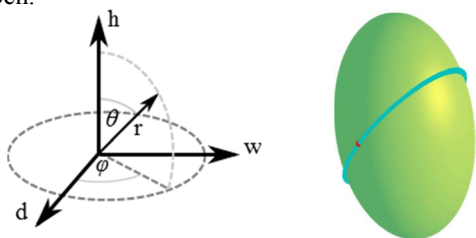
Bei dem hiesigen Ansatz wird der Kunstkopf als Ellipsoid zu modelliert. Dies dient im Folgenden als Basis für die Individualisierung. Die interaurale Zeitdifferenz (ITD), die im Frequenzbereich unter 2 kHz bei der Lokalisation dominiert [9], wird hier mit Hilfe der analytischen Schallausbreitung an einer Kugel bestimmt [1][3][4][7]. Der Kugelradius ergibt sich hierbei winkelabhängig aus dem Radius des Ellipsoiden. Im Frequenzbereich wird, ähnlich wie bei Middlebrooks [7][8], ein Faktor zwischen Kunst- und Probandenkopf aus dem Model des Ellipsoiden bestimmt, um den Frequenzbereich zu skalieren. Zur Validierung des Modells werden acht individuell gemessene HRTFs mit den individualisierten HRTFs verglichen.

## Anpassung der interauralen Zeitdifferenz

In [4] wurden drei Approximationen der ITD für tiefe, mittlere und hohe Frequenzen aus der Schallausbreitung an einer Kugel hergeleitet. Hier soll im Folgenden die Näherung für den tiefen Frequenzbereich verwendet werden:

$$ITD \approx \frac{3a}{c_0} \sin(\varphi) \quad [\text{s}] \quad (1)$$

Dabei ist  $r$  der Kopfradius,  $c_0$  die Schallausbreitungsgeschwindigkeit und  $\varphi$  der Einfallswinkel gemäß Abbildung 1. In diesem Beitrag sind die Winkel  $(\theta, \varphi)$  immer in Grad angegeben.



**Abbildung 1:** Dargestellt ist links das verwendete Koordinatensystem mit Breite ( $w$ ), Höhe ( $h$ ), Tiefe ( $d$ ), Radius ( $r$ ), Elevation- ( $\theta$ ) und Azimutwinkel ( $\varphi$ ). Rechts ist das Modell des Ellipsoiden für den Kunstkopf dargestellt. In Türkis ist die Schnittebene für  $\theta = 45^\circ$  eingezeichnet. Das rechte Ohr mit einem roten Punkt markiert.

Im Gegensatz zu [4] wird in diesem Beitrag der Kopf durch einen Ellipsoid repräsentiert. Dieser besitzt eine Höhe  $h$ , Breite  $w$  und Tiefe  $d$ .

Für die hier vorliegenden Untersuchungen wurden insgesamt acht Personen vermessen – sowohl Kopfabmessungen wie auch individuelle HRTFs mit einem Messsystem nach [5]. Für die Breite ergibt sich  $6,8 \pm 0,4\text{cm}$ , Tiefe  $10,9 \pm 0,5\text{cm}$  und Höhe  $15,2 \pm 0,9\text{cm}$ . Die Höhe  $h$  und Tiefe  $d$  wurden dabei aus dem Umfang des Kopfes bestimmt [2].

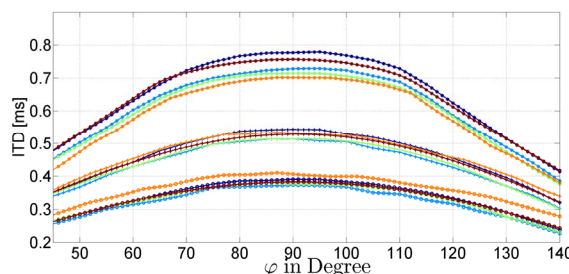
Durch den Schnitt vom Ellipsoid mit der Ebene, welche sich durch die Elevation  $\theta$  und die Ohrpunkte aufspannen lässt, ergibt sich eine Ellipse mit den Abmessungen  $a$  und  $w$ . Für den Fall  $d \neq h$  ist  $a(\theta)$  der Ellipse abhängig von der Elevation bei gleichbleibender Abmessung  $w$ . Nun werden auf dieser Ellipse die Längen von Einfallswinkel des Schalls bis zu beiden Ohren ermittelt:

$$s_{\text{Ellipse}} = a(\theta) \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{a(\theta)}{w}\right) \cdot \sin \varphi}^2 d\varphi \quad [\text{m}] \quad (2)$$

Um die ITD aus der Schallausbreitung an einer Kugel zu bestimmen, muss aus  $s_{\text{Ellipse}}$  der zu wählende Radius  $r_{\text{Sphere}}$  berechnet werden:

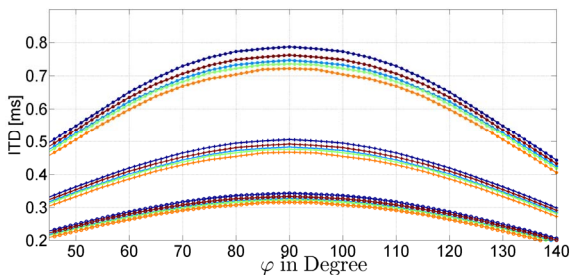
$$r_{\text{Sphere}}(\theta, \varphi) = s_{\text{Ellipse}}(\theta, \varphi) \frac{360^\circ}{2\pi \varphi} \quad [\text{m}] \quad (3)$$

Im Vergleich zwischen gemessenen und aus dem Model des Ellipsoiden berechneten ITDs fällt auf, dass der Radius  $r_{\text{Sphere}}$  in der Nähe der Ohren stark ansteigt und zu einer überhöhten ITD an diesen Stellen führt. Dies wird in den gemessenen ITDs, siehe Abbildung 2, nicht widerspiegelt und liegt daran, dass  $s_{\text{Ellipse}}$  der Schnittebene in diesem Bereich nicht dem kürzesten Weg zwischen Einfallswinkel und Ohrposition entspricht. Es zeigt sich in Abbildung 3, dass die Näherung  $d \cong h$  gut mit den gemessenen ITDs (siehe Abbildung 2) übereinstimmt.



**Abbildung 2:** Individuell gemessene ITD für unterschiedliche Elevationen ( $\theta = [20^\circ, 44^\circ, 88^\circ]$ ) von unten nach oben. Farblich sind die Probanden markiert: #1 dunkelblau, #2 hellblau, #3 grün, #4 orange, #5 rot. Diese sind exemplarisch aus den acht Probanden ausgewählt worden.

Allerdings verliert das Modell dadurch die Option auf eine individuelle Kopfhöhe einzugehen. Dies zeigt sich insbesondere bei Proband 4. Bei ihm steigt die maximale ITD mit abnehmendem Elevationswinkel im Vergleich zu den anderen Probanden an.



**Abbildung 3:** Die berechnete ITD aus den Radien des Ellipsoiden und der analytischen Lösung des Schalldrucks an einer Kugel. Die Linien sind entsprechend Abbildung 2 codiert.

Im Anschluss wird zur Individualisierung aus den jeweiligen berechneten ITDs des Probanden ein Zeitversatz für die zu skalierende kopfbezogene Impulsantwort (HRIR) für das linke und rechte Ohr berechnet:

$$\Delta t_{L/R} = t_{\text{Ellipse},S,L/R} - t_{\text{Ellipse},\text{Subj},L/R} \quad [\text{s}] \quad (4)$$

$$\text{HRIR}_{\text{indiv}} = \text{HRIR}_{\text{dummy}}(t - \Delta t_{L/R}) \quad (5)$$

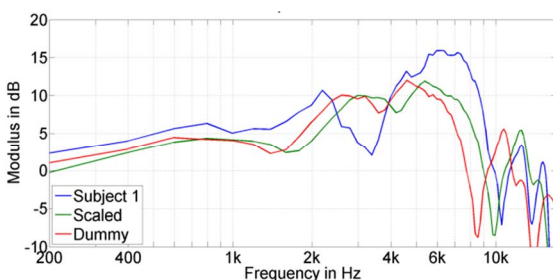
## Frequenzskalierung

Während Middlebrooks seinen Skalierungsfaktor aus empirischen Daten für den Frequenzbereich winkelunabhängig berechnet [7], soll hier nun ein Skalierungsfaktor  $k$  aus dem Ellipsoiden winkelabhängig bestimmt werden. Die Skalierung des Frequenzbereiches erfolgt dann mittels Inter- bzw. Extrapolation und Skalierung des Frequenzvektors.

$$r(\theta, \varphi) = \frac{w \cdot a(\theta)}{\sqrt{(w \cos \varphi)^2 + (a(\theta) \sin \varphi)^2}} \quad [\text{m}] \quad (6)$$

$$k = \frac{r_{\text{dummy}}}{r_{\text{subject}}} \quad [] \quad (7)$$

In Abbildung 4 ist für einen Probanden anhand des Winkels  $(\theta, \varphi) = (90^\circ, 90^\circ)$  zu erkennen, dass durch die Skalierung einige Maxima bzw. Minima, wie zwischen 4 und 10 kHz, besser übereinstimmen, jedoch trotzdem große Unterschiede im spektralen Verlauf zwischen skaliertem Kunstkopf und Probanden HRTF bestehen.



**Abbildung 4:** Vergleich der HRTF im Frequenzbereich für das linke Ohr von einem Probanden, skaliertem Kunstkopf und Kunstkopf bei  $(\theta, \varphi) = (90^\circ, 90^\circ)$ . Dies bestätigen ebenfalls die anderen skalierten und gemessenen Daten der Probanden.

## Zusammenfassung und Ausblick

Das hier vorgestellte Modell für ITD und den Frequenzbereich zeigt für die ITD, dass hier bessere Ergebnisse als mit Formel 1 erzielt werden, da der Fehler

besonders in den Winkelbereichen um  $45^\circ$  und  $135^\circ$ , wo die Abweichungen bei beiden Modellen am größten sind, von  $60\mu\text{s}$  auf unter  $10\mu\text{s}$  reduziert werden kann. Außerdem hat das hier vorgestellte Modell den Vorteil, dass es die ITD elevationsabhängig bestimmt werden kann. Dies ist nach Gleichung 1 nicht möglich. Als Nachteil beim Ellipsoiden zeigt sich, dass es bei der Unterscheidung zwischen Höhe  $h$  und Tiefe  $d$  des Kopfes zu starken Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen ITDs kommt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Ebenenschnitt nicht zwingend den minimalen Abstand zwischen Ohr und eintreffender Welle wiedergibt. Daher sollte in einem Hörversuch überprüft werden, inwieweit die Vereinfachung  $d \triangleq h$  zulässig ist. Für die Näherung  $d \triangleq h$  entfällt die Winkelabhängigkeit von  $a$ .

Im Frequenzbereich zeigt sich bei der Skalierung sehr deutlich, dass sich zwar Minima und Maxima der HRTFs spektral annähern, jedoch letztlich eine deutliche Differenz zwischen den skalierten HRTFs und denen der Probanden verbleibt. Deshalb scheint weder der Skalierungsfaktor von Middlebrooks, noch der hier vorgestellte winkelabhängige Skalierungsfaktor eine große Verbesserung zur Individualisierung aufzuweisen. Es zeigt sich viel mehr, dass Maxima, Minima und Halbwertsbreiten der Maxima von spektralen Merkmalen oberhalb von 2 kHz gesondert skaliert werden sollten. Daher eignen sich Kopfabmessungen für den Skalierungsfaktor oberhalb von 2 kHz weniger. Weil die Lokalisierungsverbesserung durch den Skalierungsfaktor bei einer Individualisierung in [7] bereits dokumentiert ist, werden zunächst keine Hörversuche mit dem hier vorgestellten Skalierungsfaktor  $k$  angestrebt.

In weiteren Arbeiten soll untersucht werden, wie die optimalen Abmessungen des Kopfes für die ITD abzunehmen sind. Durch die Asymmetrie der Köpfe der Probanden, waren die Abmessungen schwer zu reproduzieren. Außerdem war die Identifikation der Messpunkte durch den individuell geformten Kopf je nach Proband schwierig.

## Literatur

- [1] Algazi, V. Ralph; Avendano, Carlos; Duda, Richard O. (2001): Estimation of a spherical-head model from anthropometry. In: Journal of the Audio Engineering Society 49 (6), S. 472–479.
- [2] Almkvist, Gert; Berndt, Bruce (1988): Gauss, Landen, Ramanujan, the arithmetic geometric mean, ellipses, and the Ladies Diary. In: Amer. Math. Monthly 95 (7), S. 585–608.
- [3] Duda, R. O.; Algazi, V. R. (Hg.) (1999): An adaptable ellipsoidal head model for the interaural time difference. 1999 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing.
- [4] Kuhn, George F. (1977): Model for the interaural time differences in the azimuthal plane. In: The Journal of the Acoustical Society of America 62, S. 157.
- [5] Masiero, B.; Pollow, M.; Fels, J. (2011b): Individual Head-Related Transfer Function Measurement System. Acta Acustica united with Acustica 97, S. 136.
- [6] Mechel, Fridolin P. (2002): Formulas of acoustics: Springer.
- [7] Middlebrooks, John C. (1999a): Individual differences in external-ear transfer functions reduced by scaling in frequency. In: The Journal of the Acoustical Society of America 106, S. 1480.
- [8] Middlebrooks, John C. (1999b): Virtual localization improved by scaling nonindividualized external-ear transfer functions in frequency. In: The Journal of the Acoustical Society of America 106, S. 1493.
- [9] Wightman, Frederic L.; Kistler, Doris J. (1992): The dominant role of low-frequency interaural time differences in sound localization. In: The Journal of the Acoustical Society of America 91, S. 1648.