

# Skalierung der kopfbezogenen Übertragungsfunktion durch Pol- und Nullstellen

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

<sup>1</sup> Institut für Technische Akustik, Juniorprofessur für Medizinische Akustik, Kopernikusstraße 5, 52074 Aachen

<sup>2</sup> Institut für Neurowissenschaften und Medizin, Forschungszentrum Jülich, 52425 Jülich

{Marcia.Lins, Ramona.Bomhardt, Janina.Fels}@akustik.rwth-aachen.de

## Einleitung

Kopfbezogene Übertragungsfunktionen (engl. *Head-Related Transfer Functions*, *HRTF*) werden in der Akustik verwendet, um virtuelle Schallquellen und somit akustisch räumliche Szenarien zu erzeugen. Die HRTF ist abhängig von den Kopfabmessungen, sodass jeder Hörer seine individuelle HRTF besitzt. Haupteinfluss auf die HRTF haben Kopfbreite und –umfang, der Abstand des Ohres zur Schulter und bei hohen Frequenzen vor allem die Abmessungen der Pinna [1]. Da die HRTF sich mit diesen individuellen Abmessungen verändert, ist auch ein altersabhängiger Einfluss bekannt, der durch das Wachstum der Kopf- und Pinna-Geometrie hervorgerufen wird [2]. Bei Schallquellen, die mit einer fremden HRTF dargeboten werden, kann es zu Lokalisationsschwierigkeiten kommen, die beispielsweise durch die Im-Kopf-Lokalisation oder die Vorn-Hinten-Vertauschung bedingt sein können [3]. Zur Verbesserung der Lokalisation von virtuellen Schallquellen sollen universelle bzw. Kunstkopf-HRTFs durch individuelle Kopf- und Pinnaabmessungen an einen Kinderkopf angepasst werden. Dies kann unter anderem für die binaurale Wiedergabe in Kinder-Hörhilfen verwendet werden.

Zur individuellen Anpassung einer HRTF aufgrund der Veränderung der Pinna-Geometrie soll der genaue Einfluss der Pinnaabmessungen auf die Übertragungsfunktion untersucht werden. In der folgenden Arbeit werden erste CAD-Modelle erstellt, die die Untersuchung des Einflusses der Pinna-Geometrie auf die HRTF erlauben. Dazu werden beispielhaft die Pinnaabmessungen einer Familie verwendet. Um die Anzahl der anzupassenden Parameter zu reduzieren, wird die HRTF durch ihre Pol- und Nullstellen dargestellt.

## Pinnaabmessungen

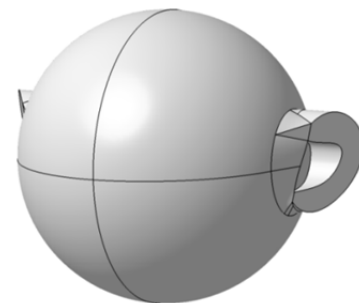
Als Grundlage für die ersten CAD-Modelle, die später die Untersuchung des Pinna-Einflusses ermöglichen sollen, dienen die Pinnaabmessungen einer Familie (Vater und drei Söhne). Die vermessenen Personen sind 1,5, 4,5, 5,8 und 35 Jahre alt. Es werden zunächst nur die Höhe und Breite der Pinna und der Cavum Conchae betrachtet. Die Abmessungen der Pinna werden mit der Schieblehre abgemessen, während von der Cavum Conchae Otoplastik-Abdrücke (Abb. 1) erstellt werden, an denen deren Abmessungen einfacher genommen werden können, als am Ohr selbst.



**Abbildung 1:** Zur Bestimmung der Abmessungen der Cavum Conchae werden Otoplastik-Abdrücke genommen, die das Abmessen anhand einer Schieblehre vereinfachen.

## CAD-Modelle und BEM-Simulation

Für erste Untersuchungen der HRTFs werden in LMS Virtual.Lab drei CAD-Modelle aus den Abmessungen des jüngsten und des ältesten Kindes und des Erwachsenen erstellt. Diese Modelle werden im Anschluss zur Simulation von HRTFs genutzt. Als Grundlage dieser Modelle dient das CAD-Modell des Kinderkunstkopfes nach [4]. Das Ohr aus diesem Modell wird nach den Abmessungen der exemplarisch gewählten Ohrabmessungen verändert. Beim reziproken Ansatz zur BEM-Simulation einer Übertragungsfunktion wird eine Schallquelle am Ohrkanaleingang platziert und eine Empfängerkugel mit der gewünschten räumlichen Abtastung in 1m Abstand zum Koordinatenursprung platziert. Die abstrahierten Ohren werden auf einer Kugel mit einem Radius von 63mm platziert (Abb. 2), was dem halben Ohrabstand des Kinderkunstkopfes entspricht. Dieser Kugelradius wird zunächst nicht variiert, da vorerst die Untersuchung der Pinnaabmessungen im Vordergrund steht.

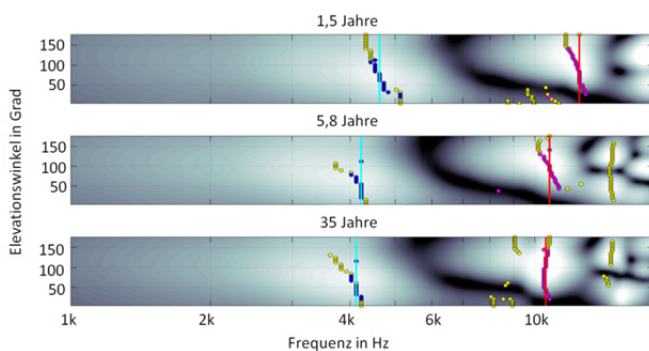


**Abbildung 2:** Zur Untersuchung des Einflusses der Pinna auf die HRTF werden drei CAD-Modelle erstellt, die sich aus einer abstrahierten Pinna auf einer Kugel zusammensetzen.

## Analyse der HRTFs

In Abbildung 3 sind die drei simulierten HRTFs des linken Ohres in der Medianebene dargestellt. Hier sollen die ersten beiden Maxima der HRTF untersucht werden. Ein automatisierter Algorithmus durchsucht die HRTFs auf alle lokalen Maxima, welche als gelbe Punkte dargestellt werden. Zunächst soll die Untersuchung sich jedoch auf die globalen Maxima beschränken, die zwischen 2,5 – 8 kHz bzw. 8 – 12 kHz liegen. Deshalb werden die lokalen Maxima, die maßgeblich zum Verlauf der HRTF beitragen, gruppiert und hier in blau bzw. pink abgebildet. Die türkise bzw. rote Linie markieren die Median-Frequenz, die sich aus dem Median der gruppierten blauen bzw. pinken Frequenzstellen ergibt.

Hier wird durch die Verschiebung der Median-Linien deutlich, dass die beiden betrachteten Maxima der HRTF mit wachsender Pinna zu tieferen Frequenzen wandern.



**Abbildung 3:** Die türkise und rote Linie markieren den Median über die gruppierten Frequenzen. Es wird deutlich, dass sich die Frequenzeigenschaften mit wachsender Pinna zu tieferen Frequenzen verschieben.

Um unter anderem diese Frequenzeigenschaften mit wachsender Pinna auszugleichen, soll zu einem späteren Zeitpunkt dieser Arbeit eine frequenzabhängige Skalierung durchgeführt werden.

## Parametrisierung der HRTF durch Pol- und Nullstellendarstellung

Zur strukturierten Skalierung der HRTF soll sie zunächst durch ihre Pol- und Nullstellen parametrisiert werden. Jede Übertragungsfunktion kann durch Formel (1) in ihrer Pol- und Nullstellendarstellung präsentiert werden:

$$H(s) = \frac{\prod_{i=1}^N (s - n_i)}{\prod_{i=1}^M (s - p_i)} \quad (1)$$

$$H(s) = \sum_{i=1}^N H_{single,i} = \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{(s - p_i)} + \sum_{i=1}^N \frac{c_i^*}{(s - p_i)} \quad (2)$$

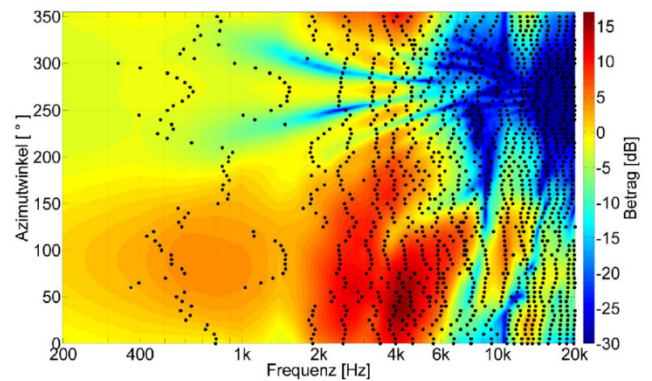
mit

$$p_{\pm i} = \sigma_i \pm j2\pi f_i, c_i = \alpha_i + j\beta_i \quad (3)$$

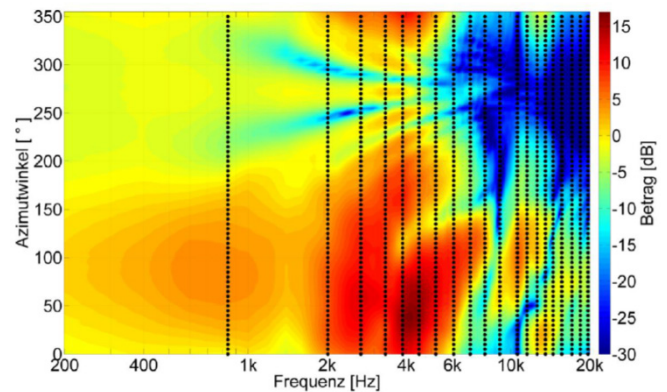
Durch eine Partialbruchzerlegung kann die Pol- und Nullstellendarstellung in eine Residuendarstellung wie in

Formel (2) überführt werden. Dabei sind  $c_i$  die Residuen, die sich aus reellen Zahlen  $\alpha_i$  und  $\beta_i$  zusammensetzen und die Amplitude des Pols  $p_i$  gewichten. Ein Pol  $p_i$  ist definiert durch die Resonanzfrequenz  $f_i$  und die Dämpfung  $\sigma_i$  [5].

Nach [6] kann ein Satz von Übertragungsfunktionen für viele Positionen im Raum durch eine einzige Kombination von Polen beschrieben werden. Ein automatisierter Algorithmus iteriert über alle Raumrichtungen und optimiert dabei alle freien Parameter, sodass die Polstellen für alle betrachteten Richtungen gleich bleiben, während die übrigen Parameter variieren können (s. Abb. 4 und 5).



**Abbildung 4:** Darstellung der HRTF in der Medianebene. Die schwarzen Punkte markieren die Polstellen der HRTFs jeder Richtung.



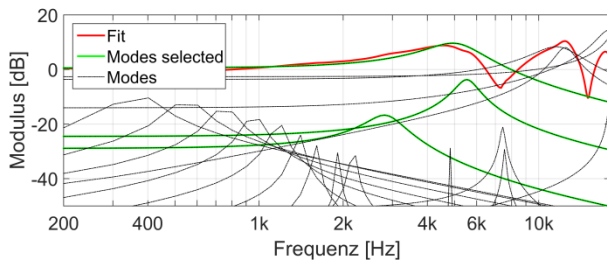
**Abbildung 5:** Die HRTFs aller Raumrichtungen können durch die gleiche Kombination von Polstellen dargestellt werden. Hier beispielhaft eine HRTF in der Medianebene.

Nach [7] kann die HRTF durch eine Anzahl von 40 Polen angemessen reproduziert werden. Aufgrund der Komplexität der Polstellen, bedeutet dies eine effektive Zahl von 20 Polstellen im positiven Frequenzbereich.

## Skalierung der HRTF durch Verschiebung der Polstellen

Die Parametrisierung der HRTF durch ihre Pol- und Nullstellen (bzw. Residuen) soll nun dazu genutzt werden, die HRTF im Frequenzbereich zu skalieren und so altersgerecht an einen Kinderkopf anzupassen. Da verschiedene anthropometrische Abmessungen auf unterschiedliche Bereiche der HRTF Einfluss nehmen, soll eine frequenzabhängige Skalierung vorgenommen werden. An den konstruierten CAD-Modellen soll zunächst der

Einfluss der Pinna untersucht werden, weshalb die oberen Frequenzen zu betrachten sind, die dazu in drei Bereiche eingeteilt werden: 2,5 – 8 kHz, 8 – 12 kHz und 12 – 18 kHz.



**Abbildung 6:** Die Skalierung soll für jeden Bereich durch eine Verschiebung derjenigen Pole realisiert werden, die den größten Einfluss auf das Maximum haben (grün).

In Abbildung 6 ist eine simulierte HRTF dargestellt. Die schwarz gestrichelten Linien repräsentieren hier die 20 effektiven Pole. Durch die Überlagerung dieser Pole kann die HRTF rekonstruiert werden (rote Linie). Zur Verschiebung eines Maximums werden die Pole ausgewählt, deren Maximum zwischen -20dB und 10 dB liegt. Für den Bereich von 2,5 – 8 kHz sind diese 3 Pole hier in grün markiert. Je nach dem, ob das gewählte Maximum nun zu höheren oder tieferen Frequenzen angepasst werden soll, sind die Polstellen entsprechend zu verschieben. Für die übrigen Frequenzbereiche wird analog vorgegangen.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit stellt erste Überlegungen zur altersgerechten Anpassung von individuellen HRTFs vor. Dazu werden CAD-Modelle mit verschiedenen Pinnageometrien erstellt, um daraus drei HRTF-Sätze mit verschiedener Pinna-Geometrie zu berechnen. Zur Parametrisierung der HRTF wird diese durch ihre Pol- und Nullstellen dargestellt und in die Residuendarstellung überführt. Durch einen Algorithmus zur Optimierung ist es möglich, die Übertragungsfunktionen vieler Raumrichtungen durch die gleichen Pole darzustellen, wodurch die Anzahl freier Parameter dieser Darstellungsweise reduziert werden kann. Die Skalierung anhand einer Verschiebung der Polstellen, soll frequenzabhängig durchgeführt werden, sodass in jedem gewählten Frequenzband nur wenige Pole aufgrund der Kopfgeometrie verschoben werden müssen.

Diese theoretischen Überlegungen zur Skalierung der HRTF durch ihre Pol- und Nullstellen müssen im Fortschritt dieser Arbeit genauer untersucht und durchgeführt werden. Um außerdem den Einfluss der Pinna genauer zu untersuchen, sollten detailliertere CAD-Modelle angefertigt werden. Um im Anschluss das Modell realistischer zu gestalten, sollten weitere Kopfabmessungen einbezogen werden, sodass beispielsweise der Kopf durch einen Ellipsoid anstelle einer Kugel modelliert wird. Eine Modellierung von Hals und Schulter würde ebenfalls die Betrachtung in tieferen Frequenzbereichen ermöglichen.

## Literatur

- [1] Blauert, Jens (1974): Räumliches Hören, *Hirzel: Stuttgart*.
- [2] Fels, Janina; Vorländer, Michael (2009): Anthropometric parameters influencing head-related transfer functions. In: *Acta Acustica united with Acustica* 95 (2), S. 331–342.
- [3] Minnaar, Pauli; Olesen, S. Krarup; Christensen, Flemming; Møller, Henrik (2001): Localization with binaural recordings from artificial and human heads. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 49 (5), S. 323–336.
- [4] Fels, J., Buthmann, P., & Vorländer, M. (2004). Head-related transfer functions of children. *Acta Acustica united with Acustica*, 90(5), 918-927.
- [5] Dietrich, Pascal (2013): Uncertainties in Acoustical Transfer Functions. Modeling, Measurement and Derivation of Parameters for Airborne and Structure-borne Sound. *Dissertation. RWTH, Aachen. Institut für Technische Akustik*.
- [6] Haneda, Yoichi; Makino, Shoji; Kaneda, Yutaka; Kitawaki, Nobuhiko (1999): Common-acoustical-pole and zero modeling of head-related transfer functions. In: *Speech and Audio Processing, IEEE Transactions on* 7 (2), S. 188–196.
- [7] Blommer, Michael A.; Wakefield, Gregory H. (1997): Pole-zero approximations for head-related transfer functions using a logarithmic error criterion. In: *Speech and Audio Processing, IEEE Transactions on* 5 (3), S. 278–287.