Individualisierung der HRTF: Ein Ellipsoidmodell zur Anpassung von interauralen Pegeldifferenzen

Marcia Lins, Ramona Bomhardt, Janina Fels

Institut für Technische Akustik, Juniorprofessur für Medizinische Akustik
Kopernikusstraße 5, 52074 Aachen
E-Mail: {mal, rbo, jfe}@akustik.rwth-aachen.de

Einleitung

Zur Erzeugung virtueller Schallquellen über Kopfhörer werden oft kopfbezogene Übertragungsfunktionen (engl. head-related transfer functions, HRTFs) von Kunstköpfen verwendet. Diese HRTF enthält alle Beugungs- und Reflexionseffekte, die vom Hörer zur Lokalisation von Schallquellen benötigt werden [1]. Aufgrund der individuellen Kopf- und Pinnageometrie hat jeder Hörer eine individuelle HRTF, die von der des Kunstkopfes abweicht, wodurch es bei der Auralisierung mit Kunstköpfen häufig zu Lokalisationsfehlern oder Im-Kopf-Lokalisation kommt [2].

Ausgehend von dem Ellipsoidmodell von Bomhardt et. al. [3] wird in diesem Beitrag die näherungsweise Berechnung der interauralen Pegeldifferenz mittels weniger geometrischer Daten der Versuchsperson vorgestellt. Dies kann zur individuellen Anpassung der interauralen Pegeldifferenzen nicht-individueller HRTFs genutzt werden. Eine subjektive Evaluierung des Verfahrens wird in Bomhardt et al. [4] vorgestellt.

Ellipsoidmodell

Das gewählte Ellipsoidmodell dient der Rückführung der individuellen Kopfgeometrie auf wenige Abmessungen. So kann ein Parameter variiert werden, während die Übrigen konstant bleiben, um den Einfluss einer Größe auf die ILD zu untersuchen. Für die präsentierten Simulationsdaten wurden die Parameter d_U und d_M variiert. d_U modelliert dabei die Position der Pinna relativ zum Kopfmittelpunkt und d_M den Ellipsoidradius (Abb. 1).

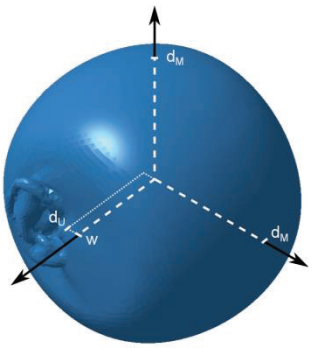

Abbildung 1: Der Kopf wird zu einem Ellipsoid vereinfacht. Dazu wird die Position der Pinna mit d_U beschrieben und der Abstand der Stirn zur Kopfmitte mit d_M.

Interaurale Zeitdifferenz

Eine simulierte ILD in der Horizontalebene für $\varphi = 0° - 180°$ ist in Abbildung 2 dargestellt, wobei es sich bei dem Azimutwinkel $\varphi = 0°$ um frontalen Schalleinfall handelt. Bei allen Frequenzen sind bei seitlichem Schalleinfall zwei Maxima ausgeprägt, die aus destruktiver Interferenz der einfallenden mit der um den Kopf gebeugten Schallwelle resultieren [5] [6]. Sowohl Lage als auch Amplitude der beiden Maxima sind frequenzabhängig.

Die ILD berechnet sich aus der Differenz der Amplituden der HRTF in dB am linken und rechten Ohr:

$$ILD = |HRTF_{links}| - |HRTF_{rechts}|$$

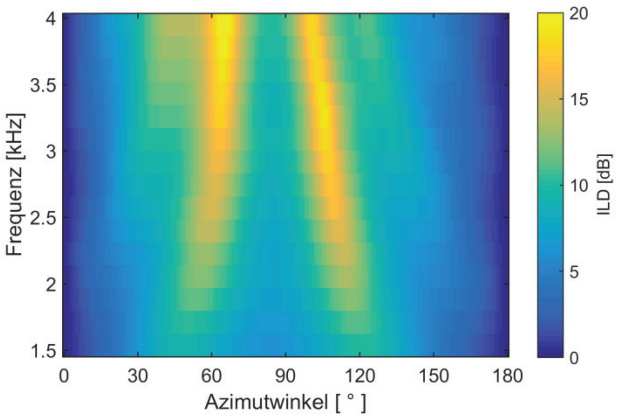

Abbildung 2: Eine simulierte ILD in der Horizontalebene über Azimutwinkel und Frequenz aufgetragen.

Simulation

Auf der Grundlage des Ellipsoidmodells wird der Einfluss der Position der Pinna $\boldsymbol{d_U}$ und der Tiefe des Kopfes $\boldsymbol{d_M}$ (siehe Abbildung 1) auf die ILD simuliert. Die Simulationen werden mit der Boundary Element Method (BEM) durch die reziproke Anordnung von Quelle und Empfänger durchgeführt. Da hier nur der Einfluss der Kopfgeometrie untersucht wird, beschränkt sich die Betrachtung vorerst auf einen Bereich von $1{,}5 - 4$ kHz. Die verwendete Pinnageometrie stammt aus dem MRT-Scan eines Probanden und wird mit 3 mm-Dreiecken vernetzt; für den Ellipsoid sind 5 mm ausreichend. Die Simulation der HRTF wird für verschiedene Positionen d_U der Pinna auf dem Ellipsoid und für verschiedene Ellipsoidradien d_M durchgeführt.

Die schrittweise Änderung der Position der Pinna auf dem Ellipsoid erlaubt die Untersuchung von deren Einfluss auf die ILD. Bei festem Ellipsoidradius wird die Position der

Pinna d_U variiert. Der Graph in Abbildung 3 zeigt die simulierte ILD bei einer Frequenz von 2,5 kHz für die verschieden Pinnapositionen gegen den Azimutwinkel. Mit größerem d_U wandern alle Charakteristika der ILD zu kleineren Azimutwinkeln. In Abbildung 4 ist die simulierte ILD bei einer Frequenz von 2,5 kHz für die verschienenden Ellipsoidradien gegen den Azimutwinkel aufgetragen. Mit größerem d_M ändern sich vor allem die Positionen und Amplituden der beiden globalen Maxima.

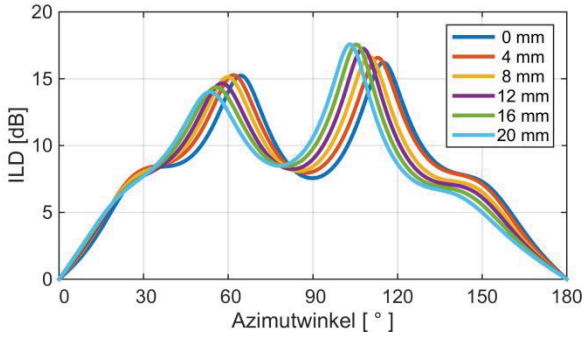

Abbildung 3: Darstellung der simulierten ILD bei einer festen Frequenz von 2,5 kHz für verschiedene Pinnapositionen d_U.

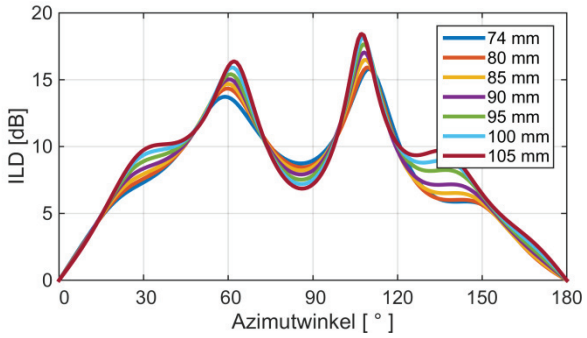

Abbildung 4: Darstellung der simulierten ILD bei einer festen Frequenz von 2,5 kHz für verschiedene Ellipsoidradien d_M.

Einfluss der Ohrposition auf die ILD

Mithilfe einer lokalen Maximumssuche werden, die Positionen und Amplituden der beiden Maxima und des Minimums der simulierten ILD im Bereich zwischen 0° und 180° Azimutwinkel in der Horizontalebene bestimmt. Die folgenden Graphen zeigen Zusammenhänge der Extrema der ILD mit den veränderten Parametern d_U und d_M. Die gestrichelten Linien repräsentieren jeweils das zweite Maximum, das bei $\varphi > 90°$ liegt.

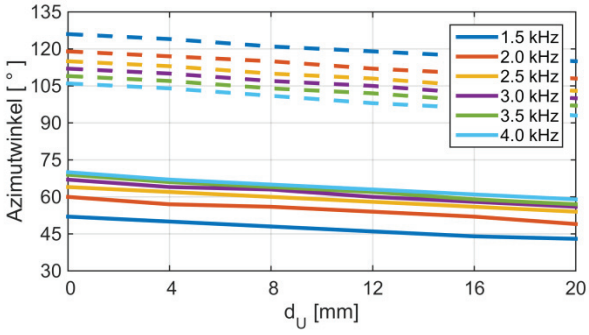

Abbildung 5: Das Auftragen der Position der Maxima gegen die Ohrposition d_U (zweites Maximum gestrichelt) zeigt einen linearen Zusammenhang.

Abbildung 5 zeigt die Position des ersten und zweiten (gestrichelt) Maximums in Abhängigkeit von der Ohrposition d_U. Dabei ergibt sich ein linearer Zusammenhang, mit frequenzunabhängiger Steigung und frequenzabhängigem Achsenabschnitt. Außerdem ist zu beobachten, dass mit höheren Frequenzen die beiden Maxima näher zusammenrücken.

Die Amplitude des zweiten Maximums (gestrichelt) verändert sich ebenfalls linear mit d_U (Abb. 6), jedoch sind hier sowohl die Steigung als auch der Achsenabschnitt frequenzabhängig. Die Amplitude des ersten Maximums verändert sich nicht stark mit d_U, muss aber frequenzabhängig beschrieben werden.

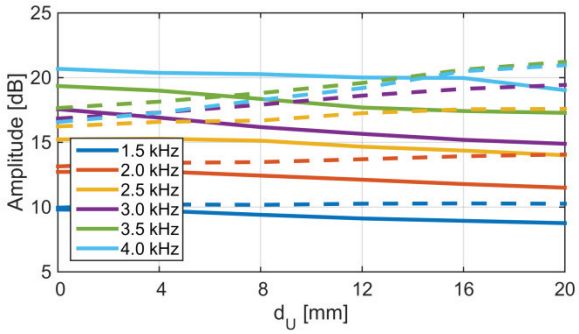

Abbildung 6: Die Amplitude des ersten Maximums bleibt über d_U annähernd konstant, während sich das zweite (gestrichelt) Maximum mit frequenzabhängiger Steigung über d_U verändert.

Abbildung 7 zeigt die Amplitude des Minimums in Abhängigkeit von d_U. Hier fällt ein nichtlineares Verhalten auf, das frequenzabhängig betrachtet werden muss.

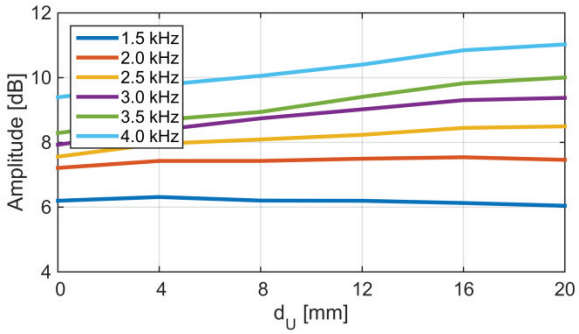

Abbildung 7: Der Graph zeigt das Verhalten der Amplitude des Minimums mit der Veränderung von d_U, welches sich nicht linearisieren lässt.

Aus der weiteren Analyse der Daten ergibt sich außerdem, dass die Position des Minimums für alle Frequenzen mit der gleichen Geradengleichung in Abhängigkeit von der Position des Ohres d_U linearisiert werden kann.

Einfluss des Ellipsoidradius auf die ILD

Wie in Abbildung 8 zu sehen, verändert sich die Position der beiden Maxima (zweites Maximum gestrichelt) mit einer geringen Steigung über dem Ellipsoidradius d_M, wobei sich die Position des ersten Maximums mit umgekehrtem Vorzeichen verändert, was für die beiden Maxima bedeutet, dass sie mit größerem d_M näher zusammenrücken. Außerdem ist weiterhin auffällig, dass die Maxima mit höheren Frequenzen näher aneinanderrücken, wie es schon der Graph in Abbildung 5 zeigt.

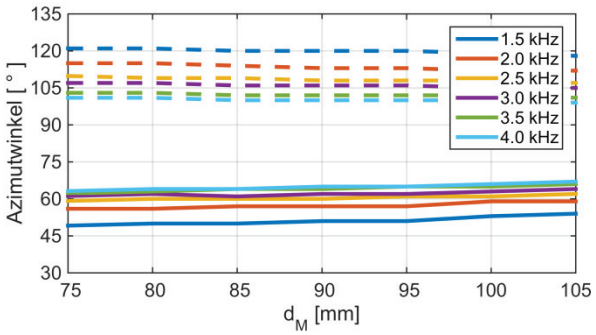

Abbildung 8: Darstellung der Positionen der Maxima der ILD in Abhängigkeit von dem Ellispoidradius d_M.

Die Amplitude der Maxima kann anhand von d_M linearisiert werden (Abb. 9). Zwar ist ein frequenzabhängiger Achsenabschnitt zu wählen, jedoch können das erste und zweite Maximum annähernd durch die gleiche Steigung beschrieben werden.

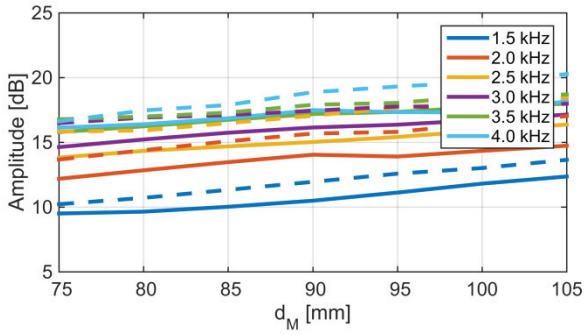

Abbildung 9: Darstellung der Amplituden der Maxima der ILD in Abhängigkeit von dem Ellispoidradius d_M.

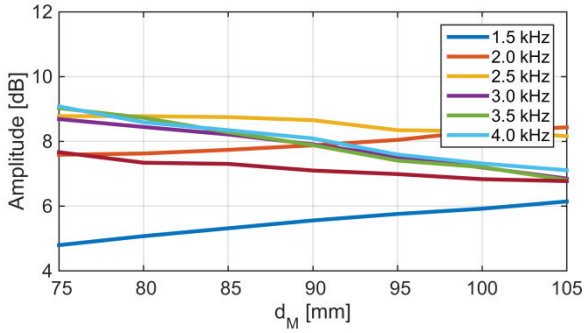

Abbildung 10: Darstellung der Amplitude des Minimums der ILD in Abhängigkeit von dem Ellipsoidradius d_M.

Der in Abbildung 10 gezeigte Verlauf der Amplitude des Minimums lässt zwar auf ein lineares Verhalten in Abhängigkeit von d_M schließen, jedoch kann hier keine frequenzabhängige Gesetzmäßigkeit hergeleitet werden. Die Position der Minima verändert sich nicht mit dem Ellipsoidradius und bleibt annähernd konstant.

Zusammenfassung

Die Simulationen zeigen, dass sich die Zusammenhänge sowohl zwischen der Ohrposition d_U als auch der Tiefe des Kopfes d_M und den Positionen der ILD Maxima über der Steigung und dem Achsenabschnitt linearisieren lassen. Weiterhin zeigt sich, dass die Ohrpostion d_U einen stärkeren Einfluss auf die Lage der Maxima hat als d_M. Die Position des Minimums verschiebt sich mit denen der Maxima. Die Amplitude des ersten Maximums ist annähernd unabhängig von d_U, während die Amplitude des zweiten Maximums frequenzabhängig mit größeren d_U steigt. In Abhängigkeit von d_M steigt die Amplitude beider Maxima wesentlich stärker als bei der Variation von d_U an. Sie wächst in beiden Fällen nichtlinear mit der Frequenz. Die Amplitude des Minimums weist ebenfalls einen nichtlinearen Zusammenhang mit d_U auf. Ein linearer Zusammenhang mit d_M ist zwar gegeben, jedoch kann hier keine Gesetzmäßigkeit mit der Frequenz abgeleitet werden.
Aus den obigen Beobachtungen lässt sich schließen, dass die Anpassung der ILD im Bereich zwischen 1,5 – 4 kHz für die Ohrposition d_U über eine Ortstransformation und die Anpassung für die Kopftiefe d_M über eine Frequenzskalierung durchgeführt werden kann.

Literatur

[1] Middlebrooks, John C.; Green, David M. (1991): Sound localization by human listeners. In: Annual review of psychology 42 (1), S. 135–159.

[2] 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

[3] Bomhardt, R.; Lins, M.; Fels, J. (2014): Individualisierung der kopfbezogenen Übertragungsfunktion. DAGA 2014, 40. Jahrestagung für Akustik. Germany Oldenburg, 10.-13.03.2014. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.

[4] Bomhardt, R.; Lins, M.; Fels, J. (2016): HRTF Individualization: Investigations on the Influence of Adapted Binaural Parameters on the Localization. DAGA 2016, 42. Jahrestagung für Akustik. Germany, Aachen, 14.-17.03.2016. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.

[5] Brungart, D. S. and Rabinowitz, W. M., “Auditory localization of nearby sources. Head-related transfer functions,” The Journal of the Acoustical Society of America, 106(3), pp. 1465–1479, 1999.

[6] Blauert, Jens (1997): Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization: MIT press.