

Hörschwellenmessung: Vergleich zwischen Kopfhörer- und Lautsprecherwiedergabe

Jochen Kleber

Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen; Email: jkl@akustik.rwth-aachen.de

1. Einleitung

Bei der Wiedergabe von Schallereignissen sind deutliche Qualitätsunterschiede zwischen Lautsprecher- und Kopfhörerwiedergabe wahrzunehmen, wie z.B. Im-Kopf-Lokalisation. Als Grund hierfür wird u.a. die akustische Belastung des Ohres durch den ohrnahen Schallwandler vermutet. In einem Hörversuch wurden die Hörschwellen in Abhängigkeit von der Wiedergabeart ermittelt. Hierfür wurden Kopfhörer ausgewählt, deren akustische Impedanz möglichst unterschiedlich ist, was durch vorangegangene Messungen ermittelt wurde. Für die Hörschwellenmessung wurden die Übertragungsfunktionen der verschiedenen Wiedergabearten im Ohrkanal gemessen und auf exakt gleichen komplexen Frequenzgang entzerrt. Als Messmethode für den Hörversuch wurde das Bekesy-Verfahren angewendet.

2. Auswahl der Kopfhörer durch Impedanzmessung

Ausgehend von Impedanzmessungen wurden die Kopfhörer für den Hörversuch ausgewählt. Hierzu wurde mit einem speziellen Impedanzmessrohr die akustische Impedanz der Kopfhörer gemessen und auf die Impedanz des freien Ohres durch Differenzbildung bezogen [1, 2, 3]. Zusätzlich sollten verschiedene Bauarten für den Hörversuch zum Einsatz kommen:

Offen, zirkumaural	Stax λ -Professional
Halboffen, supraaural	Sennheiser HD 25 SP
Halboffen, zirkumaural	Sony MDR-CD780
Geschlossen, zirkumaural	Beyerdynamik DT 770

Abb. 1 zeigt die relative Abweichung der akustischen Impedanz im Vergleich zur Impedanz der offenen Pinna.

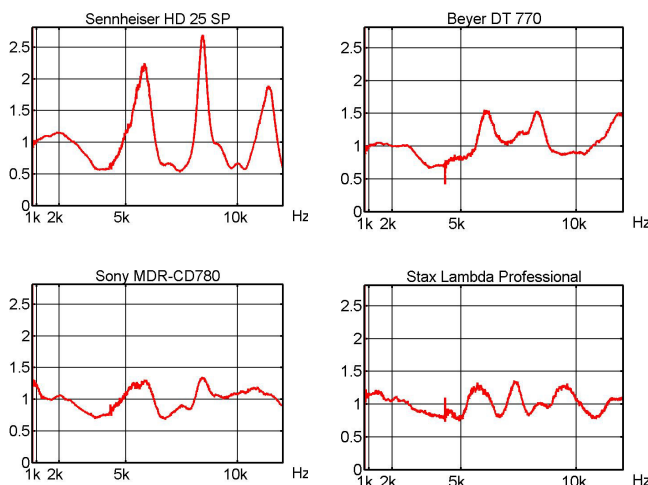


Abb. 1: Relative Abweichung der akustischen Impedanz bezogen auf die Impedanz der offenen Pinna.

3. Versuchsaufbau

Bei Vorversuchen [3] wurde die Lautsprecherwiedergabe als Referenzsituation gewählt, da sie als ideal ‚offene‘ Wiedergabeart zu betrachten ist. Da in diesem Versuch keine räumlichen Parameter

untersucht wurden, wurde ein Lautsprecher in einer Entfernung von 2 m vor der Versuchsperson platziert. Mit Sondenmikrofonen wurden die Signale 3-5 mm hinter dem Ohrkanaleingang gemessen. Alle Übertragungsstrecken, d.h. vom Lautsprecher zum Ohrkanaleingang (HRTF) und vom Kopfhörer zum Ohrkanaleingang (HPTF), wurden für jede der 22 Testperson individuell nach Betrag und Phase entzerrt. Vor Beginn des eigentlichen Hörversuchs wurden HRTF und HPTF verglichen, um Fehler in der Entzerrung bzw. eine zwischenzeitliche Veränderung der Kopfhörerposition zu erkennen, wobei Abweichungen von mehr als 1 dB als unzulässig gewertet wurden, siehe Abb. 2.

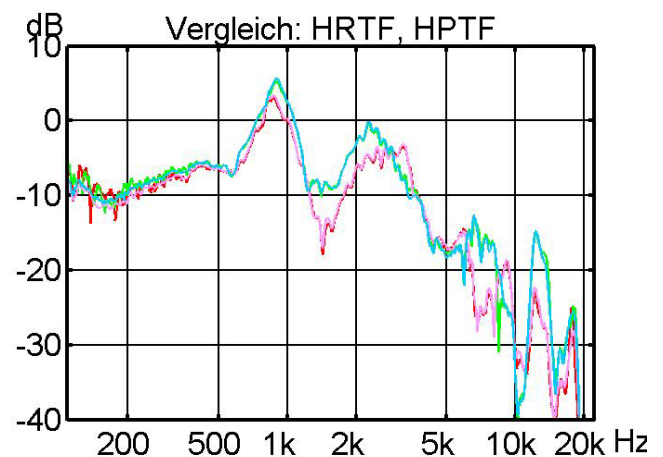


Abb. 2: HRTF und HPTF, jeweils zweikanalig. Dargestellt sind 4 Kurven. Nach idealer Entzerrung sind die Kurven für rechtes und linkes Ohr jeweils deckungsgleich.



Abb. 3: Montage der Sondenmikrofone (am Kunstkopf)

Der Versuch wurde in einem Reflexionsarmenraum durchgeführt. Für die Montage der Sondenmikrofone wurde eine am Kopf befestigte Konstruktion verwendet, die eine unbeabsichtigte Verschiebung der Sondenmikrofone erschwert.

4. Vorversuche

In Vorversuchen [3] wurde das Ausmaß des Einflusses der akustischen Impedanzbelastung auf die Parameter Lokalisation, Entfernung, Pegel und Klangverfärbung untersucht, wobei schon hier nur

sehr geringe, bzw. keine Unterschiede festgestellt wurden. Zusätzlich wurde die Übersprechkompensation als quasi „ideal offener Kopfhörer“ untersucht. Als Referenz wurden mehrere Lautsprecher verwendet, die als reale Schallquellen dienen und vom Kopfhörer oder der Übersprechkompensation wiedergegeben wurden.

5. Hörschwellenmessung

Im Hörversuch wurde der Einfluss der Belastung des Ohres mit der zusätzlichen akustischen Impedanz auf die Hörschwelle untersucht. Für die Hörschwellenmessung wurde das Bekesy-Verfahren verwendet, bei dem die Versuchsperson einen akustischen Reiz mit kontinuierlich verändertem Pegel dargeboten bekommt. Abhängig von der Antwort der Person wird der Pegel erhöht oder erniedrigt. Die Testsignale, Terzrauschen mit 8 verschiedenen Mittenfrequenzen, wurden gepulst dargeboten, weil durch die zeitliche Struktur das Signal einfacher vom physiologischem Rauschen unterschieden werden kann.

Für beide Bedingungen (Lautsprecher- bzw. Kopfhörerwiedergabe) wurde die Hörschwellenmessung mehrfach durchgeführt, um die Qualität der Versuchsperson beurteilen zu können. Im Gegensatz zu den Vorversuchen, bei denen nach jedem Paarvergleich der Kopfhörer neu entzerrt werden musste, ist die Kopfhörerentzerrung pro Kopfhörer nur einmal erforderlich. Die eigentliche Hörschwellenmessung wurde vollautomatisch mit einem PC-gestütztem Messsystem durchgeführt.

6. Versuchsergebnisse

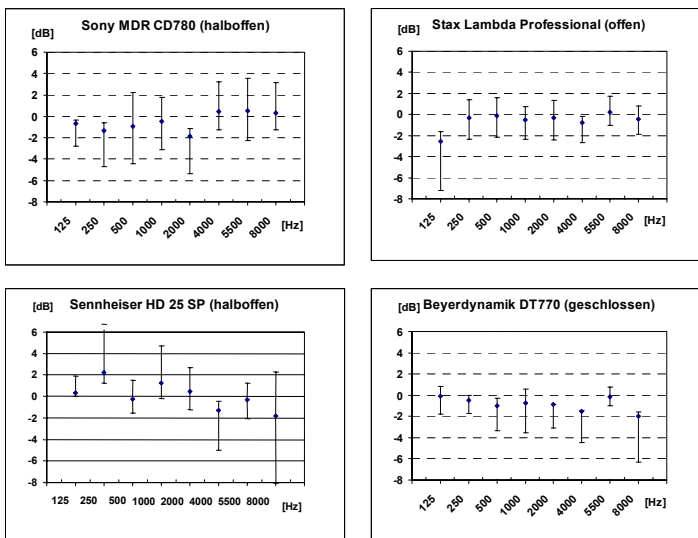


Abb. 4: Versuchsergebnis: Differenz der Hörschwelle zwischen Kopfhörer- und Lautsprecherwiedergabe.

Abb. 4 zeigt die Auswertung der Reihenuntersuchung. Dargestellt ist die Hörschwellendifferenz Kopfhörer minus Lautsprecher. D.h. positive Werte bedeuten das die Hörschwelle bei Kopfhörerwiedergabe höher als bei Lautsprecherwiedergabe ist. Als Fehlerindikator für den Medianwert sind zusätzlich die 25% Quartile eingezeichnet. Erwartungsgemäß zeigt der offene Kopfhörer die besten Resultate. Für nahezu alle Frequenzen ist die Abweichung kleiner als 1 dB. Die stärkere Abweichung bei 125 Hz beim Stax wird durch negative Ausreißer verursacht.

Entgegen der Erwartung zeigt sich beim geschlossenen Kopfhörer ein ähnliches Bild. Auch hier sind die Abweichungen in einem 1 dB Schlauch zu finden. In beiden Fällen sind die Abweichungen durchweg negativ, was den bisherigen Untersuchungen zum „Mis-

sing 6 dB Effekt“ widerspricht, bei denen bei Kopfhörerwiedergabe ein bis zu 6 dB höherer Pegel erforderlich war. Etwas uneinheitlicher sind die Ergebnisse für die beiden untersuchten halboffenen Kopfhörer. Beim Sony Kopfhörer liegen fast alle Medianwerte in einem +/- 1 dB Schlauch, was auch noch als geringe Abweichung gewertet werden kann. Allerdings ist die Streuung der Messwerte größer, wie auch beim anderen halboffenen Kopfhörer, dessen Medianwerte eine leichte Tendenz einer höheren Hörschwelle mit Kopfhörerwiedergabe zu tiefen Frequenzen erkennen lässt.

Abb. 5 zeigt beispielhaft für eine Versuchsperson die Hörschwellen für zwei verschiedene Kopfhörer sowie der Lautsprecherwiedergabe.



Abb. 5: Hörschwellenmessung: Ergebnisse für verschiedene Kopfhörer

7. Zusammenfassung

Ausgehend von Messungen der akustischen Impedanz an verschiedenen Kopfhörern wurden vier Exemplare für eine Reihenuntersuchung der Hörschwelle in Abhängigkeit der Wiedergabeart ausgewählt. Signifikante Unterschiede zwischen den Hörschwellen bei Lautsprecher- und Kopfhörerwiedergabe lassen sich bei exakter Entzerrung des Kopfhörers nicht ausmachen. Dies ist insofern überraschend, da die Effekte der „Missing 6 dB“ bisher auf eine Erhöhung der Knochenleitungshörschwelle zurückgeführt wurden und insbesondere bei Messungen nahe der Hörschwelle auffallen müssten.

8. Literatur

- [1] Vorländer, M.: „Acoustic load on the ear caused by headphones“, JASA 107 (4), April 2000
- [2] DIN ISO 10534-2 „Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren - Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion“
- [3] Kleber, J., Martín Cruzado, C.: „Akustische Impedanzmessungen an akustischen Schallwandlern“, DAGA 2001
- [4] Kleber, J., Martín Cruzado, C.: „Influence of the acoustic impedance of headphones“, Forum Acusticum, Sevilla 2002
- [5] Rudmose W., : „The case of the missing 6 dB“, J. Acoust. Soc. Am. 71, 650-659 (1982)
- [6] Fastl, H., Schmid, W., Theile, G., Zwicker, E.: „Schalle im Gehörgang für gleichlaute Schalle aus Kopfhörern oder Lautsprechern“, J. Acoust. Soc. Am. 71, 650-659 (1982)