

# Akustische Impedanzmessungen an ohrnahen Schallwandlern

Jochen Kleber, Carlos G. Martín Cruzado, Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen, jkl@akustik.rwth-aachen.de

## 1. Einleitung

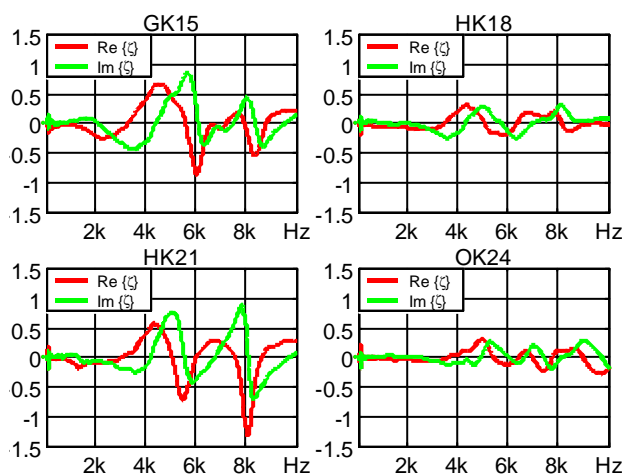
Bei der binauralen Darbietung von Schallereignissen sind manchmal deutliche Qualitätsunterschiede zwischen Abhöreinrichtungen mit Kopfhörern und mit übersprechkompensierten Lautsprecheranordnungen zu verzeichnen. Als Grund hierfür wird neben einer ungenügenden Entzerrung oder Unterschieden in der Knochenleitung die von außen wirkende akustische Belastung des Ohres vermutet.

Zur Klärung der Auswirkung der akustischen Belastung soll die akustische Impedanz des ohrnahen Schallwandlers mit Ergebnissen von Hörversuchen korreliert werden. Hierzu wurde eine Reihenuntersuchung von 25 Kopfhörern mit einem Impedanzrohr und der 2-Mikrofon-Methode durchgeführt. In Hörversuchen sollen die Auswirkungen der verschiedenen Impedanzverläufe auf empfundene Parameter wie Lautheit, Lokalisation usw. bei gleichen Trommelfellsignalen ermittelt werden

## 2. Impedanzmessungen

Die Messungen wurden mit einem Impedanzmessrohr und der Zwei-Mikrofonmethode nach DIN 10534-2 durchgeführt [1,2]. Das Messrohr ( $\varnothing_{\text{innen}} = 10\text{mm}$ ) erlaubt Messungen zwischen 200 Hz und 12 kHz. Für die ersten Hörversuche wurden von 25 Kopfhörern vier ausgewählt, deren akustische Impedanz der des offenen Ohres möglichst ähnlich ist (2x) bzw. die größte Abweichung zeigt (2x). Die Impedanzverläufe der Kopfhörer werden durch Differenzbildung auf die des freien Ohres bezogen, und können als zusätzliche akustische Belastung des Ohres durch den Kopfhörer interpretiert werden:

$$\Delta \zeta = \zeta_{\text{HP}} - \zeta_{\text{pinna}} \quad (\text{mit } \zeta = Z/\rho_0 c)$$



**Abb. 1: Zusätzliche akustische Belastung durch Kopfhörer**

Aufgrund der Differenzbildung bietet sich eine Darstellung von Real- und Imaginärteil im Vergleich zur Betragsdarstellung an. Bei der Auswahl der Kopfhörer

wurde auch auf einen möglichst unterschiedlichen Tragekomfort bei ähnlichem Impedanzverlauf geachtet.

## 3. Versuchsaufbau

Im Hörversuch sollen Testsignale mit verschiedenen Wiedergabeverfahren dargeboten und von den Versuchspersonen verglichen werden.

1) 24 Lautsprecher (LS) als Referenzsituation

2) Kopfhörer (KH)

3) Übersprechkompensation (CTC) als offener KH

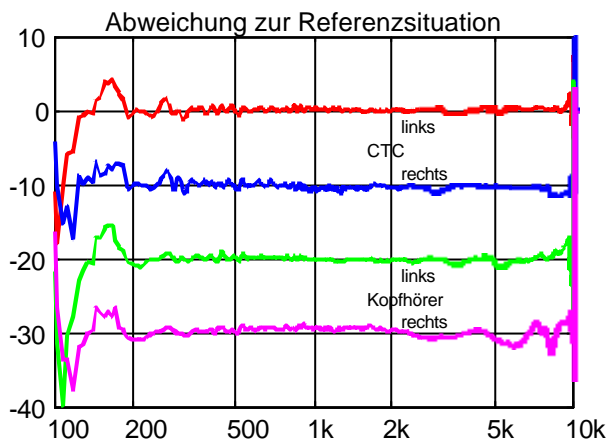
Die Lautsprecheranordnung besteht aus 12 LS in der Horizontalebene und 5 LS in der Medianebene, in einem Abstand von 2 m, sowie bis zu 7 weiteren LS, die z.B. in verschiedenen Entfernungen für Versuche zum Entfernungs hören aufgestellt werden. Diese Anordnung befindet sich in einem reflexionsarmen Raum mit schallhartem Boden, der im Bereich der LS mit Dämmmatten abgedeckt wurde. Für die Übersprechkompensation wurden 2 LS der Horizontalebene ( $\pm 60^\circ$ ) verwendet. Die Versuchsperson sitzt in der Mitte auf einem erhöhten Stuhl mit einer Ohrhöhe von ca. 2 m, wobei die Kopfposition mit einer Kopfstütze fixiert wird. Für die Messung der Ohrsignale wurde ein Sondenmikrofon verwendet, das mit einem ca. 60 mm langen gebogenem Kapillarrohr ( $\varnothing_{\text{außen}} = 1,6\text{ mm}$ ) ca. 3-5 mm hinter dem Ohrkanaleingang den Schalldruck erfasst. Die durch das Rohr bedingte Dämpfung zu hohen Frequenzen beträgt ‚nur‘ 15 dB (20 kHz), und läßt sich problemlos kompensieren.

## 4. Einmessung, Berechnung der Testsignale

Da mit allen Wiedergabearten die gleichen Trommelfellsignale, d.h. identischer Betrags- und Phasengang, erzeugt werden sollen, trägt die Versuchsperson das Sondenmikrofon während der gesamten Versuchsdauer. In einer ca. 30 s dauernden Messung werden die HRTFs für alle LS-Positionen gemessen, die dann für die Berechnung der Übersprechkompensation und die Erzeugung der Kopfhörersignale verwendet werden. Da beim Abhören der Referenzsituation auch die Restbodenreflexionen gehört werden, werden diese für die Erzeugung der Filter nicht durch Fensterung ausgeblendet. Nur schmalbandige Dips werden nicht entzerrt. Mit aufgesetztem Kopfhörer wird die Kopfhörerübertragungsfunktion (HPTF) gemessen. Beliebige Testsignale werden auf dem PC mit Filtern gefaltet, die aus den soeben durchgeführten Messungen berechnet wurden, wobei auch alle LS individuell entzerrt werden. Diese Berechnungen werden sofort durch eine Kontrollmessung überprüft, um die Identität der Ohrsignale sicherzustellen (siehe Abb. 2). Diese Messungen werden im Verlauf des Versuchs wiederholt, um Abweichungen durch Bewegung der

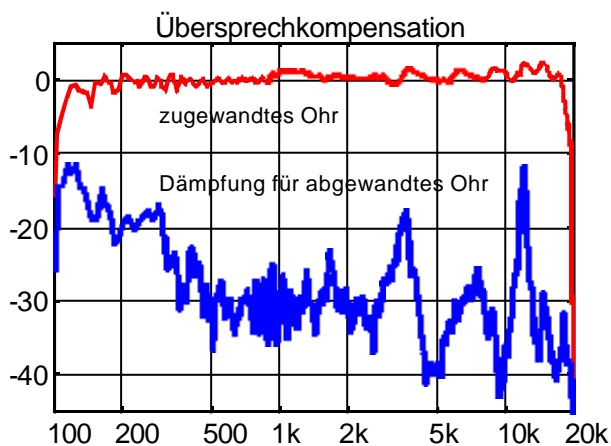
Versuchsperson oder des Mikrofons erkennen zu können. Ausgehend von den bis zu 24 gemessenen Richtungen lassen sich auch komplexere Szenen erzeugen. Auch bewußt erzeugte Reflexion durch Stellwände oder einen nicht bedämpften Boden können dargestellt werden.

## 5. Messungen



**Abb. 2: Abweichung des Frequenzgangs im Vergleich zur LS-Wiedergabe.**

Da die Berechnung der Filter aus Zeitgründen ohne manuelle Bearbeitung der Messungen erfolgen muß, wurde der Frequenzbereich zunächst auf 10 kHz begrenzt, da eine unzureichende Unterdrückung der ‚Dip-Kompensation‘ (scharfe Peaks) tonale Anteile erzeugt.



**Abb. 3: Übersprechkompensation**

Mit dem hier dargestellten Dämpfungsverlauf wurden im Hörversuch Signale dargeboten, die von der realen Quelle nicht unterschieden werden konnten.

## 6. Hörversuche

Bei den Hörversuchen handelt es sich um Vorversuche zur Gewinnung eines eigenen Eindrucks des Ausmaßes der zu erwartenden psychoakustischen Effekte und zur Planung durchzuführender Reihenuntersuchungen, wobei auch Erkenntnisse zur praktischen Durchführung gesammelt wurden. Es wurden sieben Personen befragt, von denen

vier Hörerfahrung mit binauralen Signalen haben. Obwohl sich die HPTFs durch wiederholtes aufsetzen des Kopfhörers z.T. nur geringfügig ändern, ist eine erneute Entzerrung des Kopfhörers nach jedem Wiederaufsetzen vorgesehen um Abweichungen so gering wie möglich zu halten. Dadurch kann z.B. ein Paarvergleich zwischen KH und LS bzw. CTC jeweils beginnend mit dem KH durchgeführt werden.

Nach mehrfacher Darbietung des Testsignals über den KH wird das Signal über den LS für einen direkten Vergleich angeboten. Die Personen wurden zu folgenden Parametern befragt: Lautheit, Klangverfärbung (z.B. Höhenanhebung), Lokalisation, Entfernung (Im-Kopf-Lokalisation) und empfundene Quellenbreite. Die Unterschiede wurden als sehr gering bewertet. Lokalisation und Quellenbreite wurde von allen Teilnehmern als absolut identisch beurteilt (auch für Beschallung von oben), wobei im Falle einer Abweichung eine erneute Einmessung des KH erforderlich war, was die Notwendigkeit der erneuten Einmessung, bzw. Kontrolle bestärkt. Identisch bedeutet nicht, daß die absolute Richtung der Quelle richtig erkannt wurde, was hier jedoch keine Rolle spielt. Die KH-Wiedergabe wurde von mehreren Person als leiser, näher und heller empfunden, was auf eine erste Tendenz schließen lässt.

Der Vergleich der Wiedergabe über CTC als offener Kopfhörer und LS zeigte deutlich geringere Unterschiede, wobei vier Personen keinen Unterschied hören konnten. Beim Vergleich von LS- und CTC-Wiedergabe könnten sogar kleinere Unterschiede wahrgenommen werden, da die Umschaltung zwischen den Wiedergabearten schneller geht, und keine erneute Einmessung erforderlich ist. Außerdem weiß die Versuchsperson im Vergleich zur KH-Wiedergabe natürlich nicht, welche Wiedergabeart gewählt ist.

Eine noch durchzuführende Hörschwellenmessung für LS- und KH-Wiedergabe gestaltet sich in der Durchführung unkritischer, da kein AB-Vergleich mit der Referenzsituation erforderlich ist, die ein ständiges auf- und absetzen des KHs erfordert.

## 7. Zusammenfassung

In einer Reihenuntersuchung wurden Kopfhörer ausgewählt, die das Ohr so gering, bzw. so stark wie möglich akustisch belasten. In Hörversuchen wird der Einfluß dieser Belastung bei gleichen Trommelfellsignalen untersucht.

Der beschriebene Versuchsaufbau erlaubt die Darbietung von identischen Signalen über verschiedene Wiedergabearten. In einem Vorversuch wurde die Eignung des Aufbaus für die anstehenden Hörversuche überprüft.

## 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“