

Bedingungen für gleichlaute Schalle aus Kopfhörern und Lautsprechern

Florian Völk, Andreas Dunstmair, Tobias Riesenweber, Hugo Fastl

AG Technische Akustik, MMK, Technische Universität München, 80333 München, Deutschland, florian.voelk@mytum.de

Einleitung

In der Literatur berichteten verschiedene Autoren von unterschiedlichen Schalldruckpegeln im Gehörgang für den Fall, dass bestimmte Schalle einmal mit Kopfhörern und einmal mit einem Lautsprecher so wiedergegeben werden, dass beide Darbietungen als gleich laut empfunden werden. Dies erschien insofern verwunderlich, als die Schalldruck-Zeitfunktionen an den Trommelfellen (die Ohrsignale) meistens als die einzigen akustischen Eingangsgrößen betrachtet werden, die dem Hörsystem zur Bildung der Lautheitsempfindung zur Verfügung stehen. Bis heute steht dieser Widerspruch ungeklärt im Raum. In vorliegendem Beitrag werden die wesentlichen Bedingungen für gleichlaute Schalle aus Kopfhörern und Lautsprechern basierend auf der binauralen Synthese abgeleitet. So kann der oben genannte scheinbare Widerspruch aufgelöst werden.

Vorarbeiten

In *Acoustic Measurements* konstatiert Leo L. Beranek, ein supraauraler Kopfhörer müsse, um die gleiche Lautheitsempfindung wie ein freies Schallfeld auszulösen, am Trommelfell etwa 6 bis 10 dB mehr Pegel erzeugen (Beranek 1949, S. 730/731), wobei der Ursprung dieser Differenz weitgehend unklar sei. Munson und Wiener (1952) finden bei diotischer Kopfhörerdarbietung vergleichbare Differenzen und bezeichnen den gefundenen Effekt als *The missing 6 dB*. Eine mögliche Ursache für den unerwarteten Sachverhalt seien die verschiedenen Positionen der Hörereignisse in den verglichenen Situationen. Rudmose (1982) berichtet, einen Aufbau und ein Verfahren für den Abgleich entwickelt zu haben, bei dessen Verwendung keine Pegelunterschiede im Gehörgang bei gleicher Lautheit auftreten. Ursachen für Abweichungen sind laut Rudmose Körperschallübertragung von den elektroakustischen Wandlern, Verzerrungen der Wandler und das verwendete Verfahren. Rudmose fand weiterhin, dass für einige Probanden ein nahe am Ohr befindlicher Lautsprecher mehr Pegel benötigt als ein entfernter, um gleich laut zu erscheinen, dass also die Position des Lautsprechers Einfluss auf die resultierenden Pegel haben kann. Auch Fastl et al. (1985) stellen fest, dass trotz gleichem Schallpegel im Gehörgang Töne aus Lautsprecher bzw. Kopfhörer unterschiedlich laut wahrgenommen werden können. So finden diese Autoren für Töne in der Oktave um 3 kHz gleiche Pegel im Gehörgang für gleiche Lautheit, für tiefere und höhere Frequenzen sind jedoch bei der verwendeten diotischen Kopfhörerdarbietung etwa 4 dB mehr Pegel notwendig als bei Lautsprecherdarbietung, sowohl mit geschlossenen als auch mit offenen Kopfhörern.

Methode und Vorgehen

Der Begriff *Binaurale Synthese* bezeichnet ein modernes Audiowiedergabeverfahren, das mittels Kopfhörern die Schalldrucksignale der wiederzugebenden (u. U. hypothetischen) Referenzszene an den Trommelfellen zu erzeugen sucht. Um diesem Ziel möglichst nahe zu kommen, müssen die Messung der beteiligten Impulsantworten im verschlossenen Gehörgang und die Wiedergabe mit speziellen Kopfhörern erfolgen (vgl. Møller 1992, Völk 2010). In Völk (2010) wird gezeigt, dass ein korrekt implementiertes System an einem Kunstkopf ein im Rahmen der Messgenauigkeit frequenzunabhängiges Übertragungsmaß bzgl. der Referenzszene aufweist. Dies bedeutet unter anderem auch, dass in dieser Situation die Schallpegel im Gehörgang bei Lautsprecher- und Kopfhörerbeschallung identisch sind. An einem realen Kopf sind die für eine solche Verifizierung und auch für die Implementierung des entsprechenden Systems notwendigen Messungen nicht oder nur sehr eingeschränkt durchführbar, insbesondere da sich die Erfassung der Schalldruckverteilung über dem Trommelfell sehr aufwändig darstellt. Eine übliche und praktikable Methode, die Eigenschaften eines elektroakustischen Übertragungssystems perceptiv zu adressieren, ist der Lautheitsvergleich zur Referenzszene. Trägt man den Korrekturpegel, um den Töne bezüglich einer Referenz verändert werden müssen, um gleiche Lautheit zu erreichen, über der Frequenz an, so erhält man ein perceptiv ermitteltes *Lautheitsübertragungsmaß* des betrachteten Systems. Prominente Vertreter solcher Übertragungsmaße sind Freiluft- und Diffusfeldentzerrung (vgl. z. B. Møller 1992). In vorliegendem Beitrag wird mittels Békésy-Tracking (1.5 dB und 0.05 Bark Schrittweiten, vgl. Fastl und Zwicker 2007) das Lautheitsübertragungsmaß spezieller Implementierungen binauraler Synthese im Bereich zwischen 0.2 und 24.6 Bark mit Tonimpulsfolgen bestimmt (400 ms Puls, 5 ms gaussförmige Flanken, 100 ms Pause, 400 ms Pause zwischen den Vergleichspaaren). Aufgabe der acht Probanden ist es, den Pegel des jeweils zweiten Tonimpulses (der binauralen Synthese) so zu regeln, dass die gleiche Lautheit wie von der 1.5 m entfernten Lautsprecherbox (Klein + Hummel O 98, bei konstantem Eingangspegel) hervorgerufen wird. Um wiederholtes Auf- und Absetzen der Kopfhörer zu vermeiden, ist die Referenzszene als Lautsprecherbeschallung einer Kopfhörer tragenden Versuchsperson definiert. Die binaurale Synthese wurde entsprechend der gegebenen Voraussetzungen nach Völk (2010) mit Sennheiser HD 800 Kopfhörern, falls dynamisch ausschließlich unter Berücksichtigung rotatorischer Kopfbewegungen mit 1° Auflösung, implementiert. Die betrachteten Situationen unterscheiden sich somit hinsichtlich der statischen oder dynamischen Ausführung und der Individualisierung.

Ergebnisse des Lautheitsabgleichs

Um intermodale Einflüsse zu reduzieren, wurden alle folgenden Experimente in Dunkelheit durchgeführt. Die Berechnung eines individuellen Ergebnisses erfolgte als Interpolation über die Mittelwerte jeweils zweier benachbarter Umkehrpunkte des Einregelvorgangs. Da sich die vollständig individuelle Implementierung binauraler Synthese als aufwändig erweist, werden häufig nicht- oder nur teilweise individualisierte Systeme realisiert. Folgende Graphiken zeigen die interindividuell gemittelten und frequenzgruppenbreit geglätteten Ergebnisse des Lautheitsabgleichs für verschiedene Implementierungen.

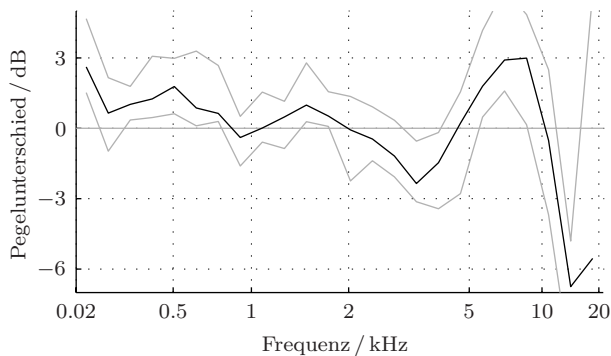


Abbildung 1: Interindividuelle Mediane und Interquartilbereiche der Pegelunterschiede zwischen den Eingangssignalen einer binaural synthetisierten und der korrespondierenden realen Lautsprecherbox in reflexionsbehafteter Umgebung, positioniert direkt vor den Probanden und mittels Békésy-Tracking auf gleiche Lautheit eingestellt. Dynamische, nicht-individuelle Synthese mit gemittelter Entzerrung des Betragsganges.

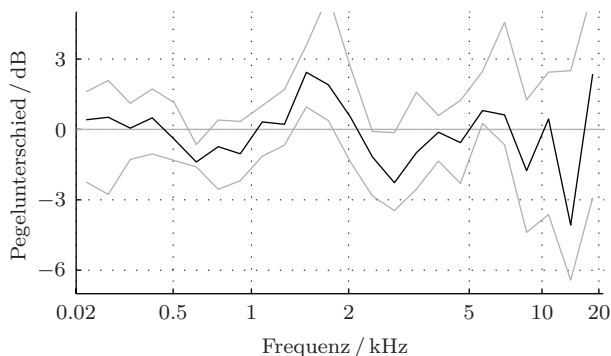


Abbildung 2: Statische, individuelle Synthese mit gemittelter Entzerrung des Betrags der Kopfhörerübertragungsfunktion.

Diskussion

Fastl et al. (1985) stellen fest, dass man „üblicherweise die Schallsignale an den Trommelfellen als die wesentlichsten akustischen Eingangsgrößen betrachtet, die zu Hörempfindungen bei Versuchspersonen führen“, dass aber im „Gegensatz dazu [...] trotz gleichem Schallpegel im Gehörgang, Töne aus Lautsprecher bzw. Kopfhörer unterschiedlich laut wahrgenommen werden können“. Die hier betrachteten Situationen stellen allerdings keinen Gegensatz dar, da die Schallsignale an den Trommelfellen zeitabhängig sind, und daher durch den Schallpegel im Gehörgang aufgrund der für dessen Berechnung vorgenommenen Effektivwertbildung nicht vollständig beschrieben werden

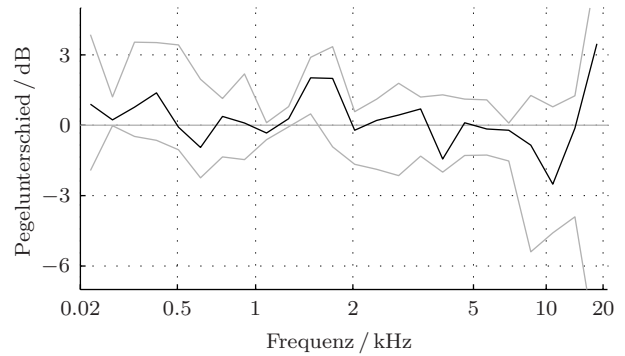


Abbildung 3: Statische, individuelle Synthese mit individueller Entzerrung des Betrags- und Phasenganges.

können. Insbesondere unterschiedliche Phasenlagen zwischen den Signalen an den beiden Trommelfellen werden durch den Pegel nicht erfasst. Dass Töne bei gleichem Schallpegel im Gehörgang als unterschiedlich laut wahrgenommen werden können ist offensichtlich richtig. Fordert man allerdings identische Zeitfunktionen der Signale an den Trommelfellen bei Kopfhörer- und Lautsprecherbeschallung (wie bei der binauralen Synthese), so werden Kopfhörer- und Lautsprecherwiedergabe bei gleichem Pegel im Gehörgang auch gleichlaut wahrgenommen, da das in Abb. 3 dargestellte Lautheitsübertragungsmaß bei statischer, individueller Synthese und Entzerrung im Rahmen der Messgenauigkeit im Mittel als frequenzunabhängig betrachtet werden kann. Dies zeigt weiterhin, dass die Veränderung der Ohrsignale aufgrund von (geringen) Kopfbewegungen die Lautheitsempfindung nicht wesentlich beeinflussen. Deutlichen Einfluss auf die Lautheit von binauraler Synthese zeigen dagegen neben den benutzten Kopfhörern (vgl. Völk 2010) die Individualisierung der Synthese (vgl. Abb. 1 und 2) und die verwendete Kopfhörerentzerrung (vgl. Abb. 2 und 3). Letzterer Vergleich verdeutlicht den Einfluss der interauralen Phasenlage auch für Sinustöne. Die vergrößerten Interquartilbereiche in Abb. 3 deuten auf die Implementierungsschwierigkeiten einer solchen Synthese und Entzerrung hin.

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Projekt FA 140/4 gefördert.

Literatur

- Beranek L. L.: *Acoustic Measurements* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1949)
- Fastl H., W. Schmid, G. Theile, E. Zwicker: Schallpegel im Gehörgang für gleichlaute Schalle aus Kopfhörern oder Lautsprechern. In *Fortschritte der Akustik, DAGA '85*, 471–474 (1985)
- Fastl H., E. Zwicker: *Psychoacoustics - Facts and Models*. 3rd edition (Springer, Berlin Heidelberg, 2007)
- Møller H.: Fundamentals of Binaural Technology. *Appl. Acoustics* **36**, 171–218 (1992)
- Munson W. A., F. M. Wiener: In Search of the Missing 6 Db. *J. Acoust. Soc. Am.* **24**, 498–501 (1952)
- Rudmose W.: The case of the missing 6 dB. *J. Acoust. Soc. Am.* **71**, 650–659 (1982)
- Völk F.: Messtechnische Verifizierung eines datenbasierten binauralen Synthesystems. In *Fortschritte der Akustik, DAGA 2010*, 1049–1050 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin, 2010)