

Messtechnische Verifizierung eines datenbasierten binauralen Synthesystems

Florian Völk

AG Technische Akustik, MMK, TU München, 80333 München, E-Mail: florian.voelk@mytum.de

Einleitung

Binaurale Syntheseverfahren zielen darauf ab, die Hörereignisse einer Referenzszene durch möglichst korrektes Einprägen der Schalldrucksignale an den Trommelfellen (der Ohrsignale), die in eben dieser Referenzszene auftreten würden, zu reproduzieren (vgl. [1]). Zu diesem Zweck müssen die Impulsantworten der beteiligten Systeme ermittelt oder angenähert werden (die Systeme können in guter Näherung als linear und stückweise zeitinvariant angenommen werden, vgl. [2]). Vorhandene Verfahren werden in Abhängigkeit des Ansatzes kategorisiert, der zur Gewinnung der Impulsantworten der Übertragungsstrecke von der Schallquelle zu den Trommelfellen (der sogenannten kopfbezogenen Impulsantworten) verfolgt wird. In datenbasierten Ansätzen wird versucht, die notwendigen Impulsantworten durch Messungen zu bestimmen (vgl. z. B. [3]), für modellbasierte Verfahren nutzt man Kenntnisse über die Ausbreitung von Schallfeldern um die Impulsantworten zu synthetisieren (vgl. [4]). In diesem Beitrag wird über Messungen der Impulsantworten eines datenbasierten binauralen Raumsynthesystems (BRS) in verschiedenen Konfigurationen die Korrektheit der erzeugten Ohrsignale geprüft. Abweichungen zwischen Synthese- und Referenzsituation werden, unter Berücksichtigung verschiedener Kopfhörertypen und -bauformen, vor allem auch im Hinblick auf die individuelle Wiedergabe und Aufnahme, diskutiert. Insbesondere wird dabei Augenmerk auf die Randbedingungen und Effekte gelegt, die die Messung kopfbezogener Impulsantworten mit Miniaturmikrofonen im verschlossenen Gehörgang mit sich bringt.

Systemtheoretische Grundlagen

Signale und Systeme im Zeitbereich werden hier ungeachtet ihres digitalen oder analogen Charakters mittels Kleinbuchstaben ohne explizite Kennzeichnung der Zeitabhängigkeit bezeichnet, Spektren und Übertragungsfunktionen mittels Großbuchstaben. Die Invertierbarkeit aller Impulsantworten wird als gegeben angenommen. Alle Messungen wurden mit dem in [5] vorgestellten System durchgeführt. Abbildung 1 zeigt das Blockschaltbild einer Lautsprecherwiedergabesituation, die im Folgenden als mittels BRS zu synthetisierende Referenzszene (bei unbewegtem Hörer) betrachtet wird.

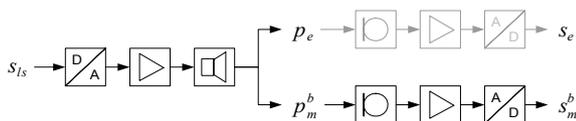


Abbildung 1: Wiedergabekette, Schalldrucksignale im Gehörgang und mögliche Aufnahmeketten bei Lautsprecherbeschallung. Beobachtungspunkte am Trommelfell (oben) und im verschlossenen Gehörgang (unten).

Das digitale Audiosignal s_{ls} wird mittels eines digital/analog-Umsetzers in analoge Form gebracht, verstärkt und über einen Lautsprecher abgestrahlt. Am Trommelfell eines (u. U. künstlichen) Kopfes liegt das Ohrsignal p_e an.

Kopfbezogene Impulsantworten für individuelle binaurale Synthese werden üblicherweise mit einem in den verschlossenen Gehörgang eingesetzten Miniaturmikrofon gemessen (dunkle Teile in Abb. 1, vgl. [1]). Das dann am Miniaturmikrofon liegende Schalldrucksignal wird als p_m^b bezeichnet, die korrespondierende digitale Sequenz als s_m^b . Folgende Übertragungsfunktionen können damit definiert werden:

$$H_{ref} = \frac{P_e}{S_{ls}}; \quad H_{ref}^b = \frac{P_m^b}{S_{ls}} \quad (1)$$

Das Ohrsignal kann mit einem Sonden- oder Kunstkopfmikrofon in eine Spannung gewandelt, dann verstärkt und in digitale Form (s_e) gebracht werden (hell in Abb. 1). Es ergeben sich folgende zu den kopfbezogenen Impulsantworten korrespondierende kopfbezogene Übertragungsfunktionen:

$$H_{rec} = \frac{S_e}{S_{ls}}; \quad H_{rec}^b = \frac{S_m^b}{S_{ls}} \quad (2)$$

Die einfachste Methode zur Darbietung binaural synthetisierter Signale ist die Kopfhörerwiedergabe, deren Blockschaltbild in Abbildung 2 dargestellt ist.

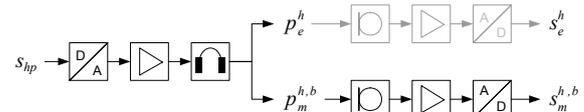


Abbildung 2: Wiedergabekette bei Kopfhörerbeschallung.

Das wiederzugebende digitale Audiosignal wird hier als s_{hp} bezeichnet, alle weiteren betrachteten Signale werden nach dem gleichen Schema wie bei der Lautsprecherwiedergabe bezeichnet, ergänzt um den oberen Index h , um Betrachtung unterhalb des Kopfhörers zu indizieren. Es gilt:

$$H_{play} = \frac{P_e^h}{S_{hp}}; \quad H_{play}^b = \frac{P_m^{h,b}}{S_{hp}} \quad (3)$$

Folgende Kopfhörerübertragungsfunktionen werden für die vorliegenden Betrachtungen benutzt:

$$H_{hp}^h = \frac{S_e^h}{S_{hp}}; \quad H_{hp}^{h,b} = \frac{S_m^{h,b}}{S_{hp}} \quad (4)$$

Für individuelle binaurale Synthese wird typischerweise die Kopfhörerübertragungsfunktion invertiert und mit der kopfbezogenen Übertragungsfunktion sowie dem Lautsprecher-signalspektrum multipliziert, um das Spektrum des über Kopfhörer darzubietenden Signals zu erhalten. Nimmt man alle Messungen im verschlossenen Gehörgang vor, so ergibt sich bei Kopfhörerwiedergabe die in Abbildung 3 gezeigte BRS-Wiedergabekette. Die Beiträge der grau hinterlegten Systeme heben sich auf, falls für alle Aufnahme- und Wiedergabesituationen dieselben Komponenten benutzt werden und Verschluss des Gehörgangs die Kopfhörereigenschaften nicht beeinflusst. Folgende Übertragungsfunktionen werden zur Beschreibung der BRS-Wiedergabesituation definiert:

$$H_{rec,BRS}^h = \frac{S_{e,BRS}^h}{S_{ls}}; \quad H_{rec,BRS}^{h,b} = \frac{S_{m,BRS}^{h,b}}{S_{ls}} \quad (5)$$

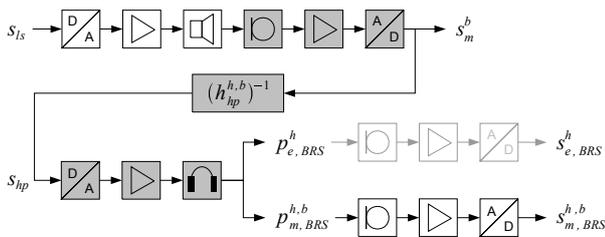


Abbildung 3: Wiedergabekette bei Binauraltechnik.

Verifizierung: Methode und Ergebnisse

Um Übereinstimmung der Ohrsignale in BRS- und Referenzsituation und so Funktionsfähigkeit der BRS sicherzustellen, ist folgende Gleichung notwendig und hinreichend:

$$H_{rec,BRS}^h = H_{rec} \Rightarrow \frac{H_{rec}}{H_{rec,BRS}^h} = 1 \quad (6)$$

Abbildung 4 zeigt farbig und fett gedruckt für verschiedene typische Kopfhörer den Betrag des in Gl. (6) angegebenen Verhältnisses über der Tonheit (vgl. [6]), gemessen mit einem Kunstkopf (Neumann KU 80), der so modifiziert wurde, dass in einem Gehörgang ein Miniaturmikrofon (Sennheiser KE 4-211-2) sowohl am Eingang als auch zwei Zentimeter innerhalb (etwa an der Trommelfellposition) angebracht werden kann, ohne dass möglicherweise vorhandene Kopfhörer repositioniert werden müssen. Das Mikrofon verschließt in beiden Fällen den Gehörgang (Durchmesser etwa 5mm), der in seinen Materialeigenschaften und Abmessungen nicht dem menschlichen Gehörgang entspricht. Trotzdem können die Messungen als Indikator für Auftreten und Richtung etwaiger Effekte dienen. Abgesehen von einigen durch den verwendeten Messaufbau verursachten Abweichungen, die sich in allen Messungen zeigen, ist ersichtlich, dass die Qualität der binauralen Synthese vom verwendeten Kopfhörer abhängt.

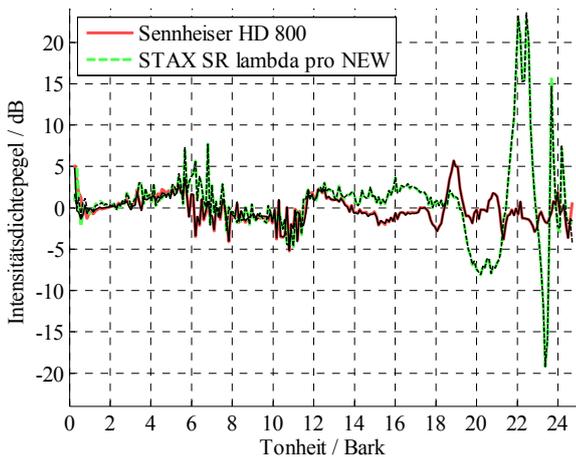


Abbildung 4: Betrag des Verhältnisses der Gesamtsystemübertragungsfunktionen bei Lautsprecherwiedergabe und individueller binauraler Synthese derselben Situation (dick farbig) und Betrag des Verhältnisses der Verhältnisse der Übertragungsfunktionen zum Trommelfell und verschlossenen Gehörgang in Lautsprecher- und Kopfhörersituation (dünn schwarz) für zwei verschiedene Kopfhörer.

Individuelle binaurale Synthese beruht bei Messung im verschlossenen Gehörgang darauf, dass in der BRS-Situation am verschlossenen Gehörgang das Schalldrucksignal der zu synthetisierenden Referenzsituation erzeugt wird. Es wird

angenommen, dass sich bei offenem Gehörgang in beiden Situationen am Trommelfell das gleiche Schalldrucksignal einstellen wird. Da jedoch in der Referenzsituation im Gegensatz zur BRS-Situation kein Kopfhörer getragen wird, können die verwendeten Kopfhörer das Signal beeinflussen.

Kopfhörerauswahlkriterium

Die in Gleichung (6) gegebene Bedingung kann auf folgendes Kopfhörerauswahlkriterium reduziert werden, das ohne Messung der Übertragungsfunktion des BRS auskommt:

$$\frac{H_{rec}}{H_{rec}^b} = \frac{H_{hp}}{H_{hp}^{h,b}} \Rightarrow \frac{H_{rec}/H_{rec}^b}{H_{hp}/H_{hp}^{h,b}} = 1 \quad (7)$$

Abbildung 4 zeigt als dünne schwarze Linien für die beiden betrachteten Kopfhörer das in Gleichung (7) definierte Kopfhörerauswahlkriterium für die schon in Gl. (6) betrachtete Situation. Ein Vergleich der Messergebnisse der beiden Situationen macht deutlich, dass beide Kriterien nahezu identische Ergebnisse liefern, was auch bedeutet, dass hier etwaige Rückwirkungen des verschlossenen Gehörgangs auf den Kopfhörer vernachlässigbar sind. Anschaulich gesprochen fordert das eingeführte Kopfhörerauswahlkriterium für individuelle BRS, dass die verwendeten Kopfhörer keinen Einfluss auf den Zusammenhang der Schalldrucksignale am verschlossenen Gehörgang und am Trommelfell zeigen.

Zusammenfassung

Mit dem hier vorgestellten Aufbau ist es möglich, die Übertragungsfunktionen binauraler Synthesysteme mittels eines Kunstkopfs zu messen. Die Messergebnisse zeigen, dass die verwendeten Kopfhörer auch bei theoretisch korrekter Entzerrung die Übertragungsfunktionen binauraler Synthese insbesondere bei Messung im verschlossenen Gehörgang maßgeblich beeinflussen können. Mit geeigneten Kopfhörern zeigt die Übertragungsfunktion des Systems dagegen kaum Abweichungen von der zu synthetisierenden Referenzsituation. Die Einflüsse der Kopfhörer können mittels eines vorgestellten Auswahlkriteriums anhand von Kunstkopfmessungen ohne Verwendung eines speziellen binauralen Synthesystems prognostiziert werden.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei Prof. Dr.-Ing. H. Fastl für die Möglichkeit, diese Arbeit durchzuführen, sowie bei Sennheiser electronic GmbH & Co. KG für das Überlassen der Mikrophone. Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projekts FA 140/4 gefördert.

Literatur

- [1] Møller, H.: Fundamentals of Binaural Technology. *Appl. Acoustics* **36**, 171-218 (1992)
- [2] Blauert, J.: *Spatial Hearing. The Psychophysics of Human Sound Localization*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London (1997)
- [3] Völk, F.; Kerber, S.; Fastl, H.; Reifinger, S.: Design and Realisierung von virt. Akustik für ein AR-Labor. *Fortschritte der Akustik, DAGA '07*, DEGA e. V., Berlin (2007)
- [4] Vorländer, M.: *Auralization – Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*, Springer, Berlin, Heidelberg (2008)
- [5] Völk, F.; Straubinger, M.; Roalter, L.; Fastl, H.: Measurement of HRIRs for Psychoacoustic Research. *Fortschritte der Akustik, DAGA '09*, DEGA e. V., Berlin (2009)
- [6] Fastl, H.; Zwicker, E.: *Psychoacoustics – Facts and Models*. 3rd ed., Springer, Berlin, Heidelberg (2007)