

Psychoakustik der Wellenfeldsynthese: Vor- und Nachteile binauraler Simulation

Hagen Wierstorf, Sascha Spors, Alexander Raake

T-Labs, Technische Universität Berlin, 10587 Berlin, Deutschland, Email: hagen.wierstorf@tu-berlin.de

Einleitung

Bei der Wellenfeldsynthese (WFS) handelt es sich um ein vielkanaliges Schallfeldsyntheseverfahren, das in der Lage ist das Schallfeld virtueller Quellen in einem ausgedehnten Zuhörerbereich zu synthetisieren [1]. Da zur Synthese des Schallfelds eine räumlich kontinuierliche Verteilung von Lautsprechern nötig wäre, kommt es bei den in der Praxis verwendeten Lautsprechergruppen zu einer räumlichen Unterabtastung. Dieses führt zu Artefakten im synthetisiertem Schallfeld oberhalb der sogenannten räumlichen Aliasfrequenz f_{al} , welche für heutige Lautsprecheranordnungen zumeist unterhalb von 2000 Hz liegt. Die Auswirkungen dieser Artefakte auf die Wahrnehmung sind Bestandteil aktueller Forschung [2]. Unter anderem sind die Auswirkungen auf die beiden psychoakustischen Größen Lokalisation und Klangfarbe Untersuchungsgegenstand. Dabei ist insbesondere ihre Veränderung in Abhängigkeit von der Aliasfrequenz und vom Ort im Zuhörerbereich von Interesse. In der Praxis müssten eine Reihe von Lautsprechergruppen mit teilweise sehr hoher Anzahl an Lautsprechern realisiert werden. Zur Untersuchung der Abhängigkeit von der Position im Zuhörerbereich wäre es außerdem von Vorteil, Versuchspersonen instantan und reproduzierbar an unterschiedliche Positionen verschieben zu können. Da dies in der Realität nur schwer realisierbar ist, bietet sich mit der binauralen Synthese eine Methode an, verschiedene Zuhörerpositionen und Lautsprechergruppen per Kopfhörer zu simulieren.

Binaurale Synthese eines Lautsprechers

Bei der binauralen Synthese wird ein einzelner Lautsprecher mittels seiner Übertragungsfunktionen (BRTF) über Kopfhörer simuliert. Auf diese Weise soll erreicht werden, dass am Trommelfell des Zuhörers der gleiche Schalldruck anliegt wie im Falle der Wiedergabe mit Hilfe des realen Lautsprechers. Leichte Kopfbewegungen der Versuchsperson verändern die BRTF zwischen Zuhörer und Lautsprecher. Daher wird hier im folgenden die dynamische binaurale Synthese verwendet, bei der Kopfdrehungen mit Hilfe eines Headtrackers (Polhemus Fastrak) erfasst und durch Austauschen der BRTFs berücksichtigt werden.

In der Realität kann der Schalldruck am Trommelfell des Zuhörers nur sehr schwer korrekt wiedergegeben werden, insbesondere wenn wie im Folgenden nur nicht-individualisierte Übertragungsfunktion zur Wiedergabe verwendet werden.

Um den Einfluss dieser Unterschiede auf die Wahrnehmung des Zuhörers zu untersuchen wurde ein Versuch durchgeführt, bei dem Versuchsteilnehmer die Wieder-

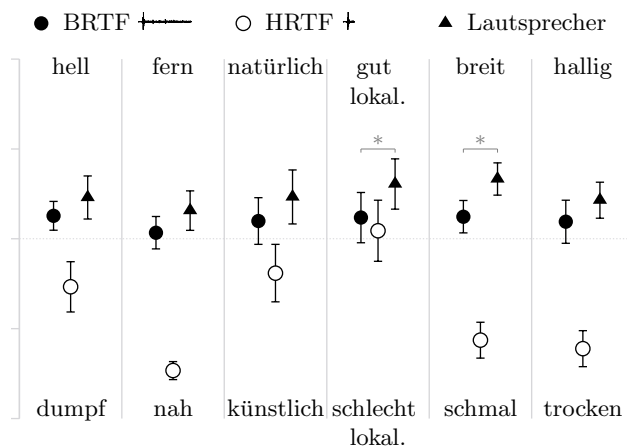


Abbildung 1: Ergebnisse der Attributskalierung für einen einzelnen Lautsprecher verglichen mit seiner binauralen Synthese via BRTF oder HRTF. Die jeweilig bewerteten Pole der Attributpaare sind jeweils unter und oberhalb der Bewertungen angegeben.

gabe über einen Lautsprecher mit der binauralen Synthese dieses Lautsprechers mit Hilfe einer Attributskalierung vergleichen sollten. Dazu wurde in einem Raum mit geringen Reflexionen ($T_{60} < 1$ s) Impulsantworten von vier Lautsprechern (Elac 301) mit Hilfe eines Kopf-Torso-Simulators (KEMAR) aufgenommen, die sich jeweils bei 0° , 90° , 180° und 270° befanden. Der Kunstkopf trug während der Messung die gleichen offenen Kopfhörer (AKG K601) wie die Versuchspersonen während der Bewertung. Die binaurale Simulation wurde sowohl mit den BRTFs durchgeführt, die alle Raumreflexionen enthielten und gekürzten BRTFs, aus denen künstlich die Reflexionen entfernt worden sind und die hier als HRTFs bezeichnet werden, vgl. Abb. 1.

In Abb. 1 sind die Mittelwerte über alle 12 Versuchspersonen, die vier Lautsprecher und die beiden verwendeten Audiomaterialien Sprache und Musik dargestellt. Die Fehlerbalken zeigen die jeweiligen Konfidenzintervalle. Es ist zu erkennen, dass es vor allem für die binaurale Simulation mit Hilfe der HRTFs zu starken Abweichungen von der realen Lautsprecherwiedergabe kommt. So wird die simulierte Quelle als viel näher, schmaler und trockener wahrgenommen. Aber auch auf die Klangfarbe scheinen die fehlenden Reflexionen einen Einfluss zu haben, da sie auch als dumpfer bewertet wurde. Im Fall der binauralen Simulation mit Hilfe der BRTFs sind geringere Unterschiede erkennbar. Signifikant sind diese nur für die beiden Attributpaare *breit vs. schmal* und *gut lokalisierbar vs. schlecht lokalisierbar*.

Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass das Vor-

handensein oder Fehlen von Reflexionen in Impulsantworten bei der binauralen Synthese vor allem Auswirkungen auf die Externalisierung des simulierten Lautsprechers hat und diese mit HRTFs ohne Reflexionen nur sehr schwer zu erzielen ist.

Binaurale Synthese von Lautsprechergruppen

Zur Untersuchung der Schallfeldsynthese mit Hilfe binauraler Synthese ist nicht nur die Simulation eines einzelnen Lautsprechers notwendig, die im vorherigen Kapitel untersucht worden ist, sondern in der Regel die Simulation beliebig komplexer Lautsprechergruppen. Daher werden in der Regel nicht die HRTFs der gesamten Gruppe, sondern die eines einzelnen Lautsprechers gemessen. Anschließend wird aus diesen HRTFs durch Extra- und Interpolation die Gruppe virtuell aufgebaut. Auf diese Weise kann es zu Abweichungen von der realen Lautsprechergruppe kommen. Völk et al. haben gezeigt, dass es einen Unterschied von bis zu 4 dB in der gemessenen HRTF geben kann, wenn diese in An- bzw. Abwesenheit benachbarter Lautsprecher gemessen wird [3].

Hier soll nun der Einfluss der Lautsprecherdirektivität untersucht werden. Wird eine Lautsprechergruppe durch einen einzelnen Lautsprecher aufgebaut, ist jeder einzelner dieser virtuellen Lautsprecher in Richtung des Zuhörers ausgerichtet (vgl. die untere Gruppe in Abb. 2). Im Gegensatz zu dem Fall einer realen Lautsprechergruppe (vgl. die obere Gruppe ebenda). Um den Unterschied zu quantifizieren ist der Unterschied im Frequenzgang der beiden Gruppen mit Hilfe einer Gammatonfilterbank mit einer Auflösung von 1 ERB berechnet worden. In Abb. 2 ist der Unterschied an den Mittenfrequenzen der Filterbank dargestellt. Die Position der einzelnen Lautsprecher ist dabei farblich markiert, wobei hellere Linien Lautsprecher am Rand der Gruppe markieren. Es ist zu erkennen, dass für hohe Frequenzen ein klarer Effekt der Direktivität zu erkennen ist, der sich in einem Unterschied von bis zu 15 dB bemerkbar macht.

Im Rahmen von WFS sei darauf hingewiesen, dass dort in der Theorie ebenfalls davon ausgegangen wird, dass die Lautsprecher keine Direktivität aufweisen. Daher kann es interessant sein, dass sich dieser Fall durch binaurale Synthese herstellen lässt.

Binaurale Synthese und Psychoakustik der WFS

In den vorherigen Kapiteln wurden physikalische und perzeptive Unterschiede zwischen einer realen und einer binaural simulierten Lautsprechergruppe aufgezeigt. In diesem Kapitel soll nun abschließend diskutiert werden, welchen Einfluss diese Unterschiede auf die zu untersuchenden psychoakustischen Größen Klangfarbe und Lokalisation in der WFS haben.

Die binaurale Synthese einer Lautsprechergruppe kann zu einer Klangverfärbung verglichen mit der realen Gruppe führen (vgl. Abb. 1). Gleichzeitig beschränkt sich die

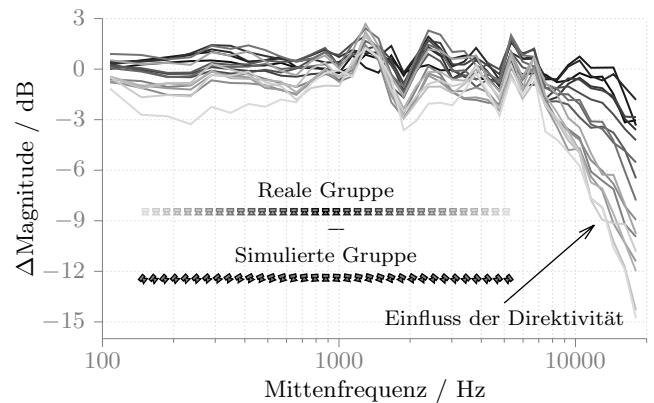


Abbildung 2: Unterschied im Frequenzgang zwischen einer gemessenen Lautsprechergruppe und einer mit einem einzelnen Lautsprecher simulierten Gruppe. Die Frequenzauflösung ist dabei der des Gehörs angepasst, indem eine Gammatonfilterbank mit einer Auflösung von 1 ERB gewählt wurde.

Untersuchung der Klangfarbe bei der Wellenfeldsynthese oft auf die Fragestellung eines direkten Vergleichs verschiedener Aufbauten oder zu einer bestimmten Referenz (z.B. Stereophonie). Das heißt es gilt nur den Unterschied in der Klangfarbe zwischen diesen zu bewerten und nicht die absolute Klangfarbe. Daher ist davon auszugehen, dass eine leichte Abweichung der absoluten Klangfarbe durch die binaurale Synthese keinen Einfluss auf die zu untersuchenden Klangunterschiede haben wird.

Zu der Fragestellung nach der Auswirkung der binauralen Synthese auf die Lokalisation liegen Ergebnisse vor, die keine Beeinträchtigung von Richtungsexperimenten zeigen [4]. Gleichzeitig müssen komplexere Szenarien, bei denen die Externalisierung eine Rolle spielt, mit Vorsicht untersucht werden. Wie in Abb. 1 zu erkennen ist, kann diese bei unzureichenden Impulsantworten stark beeinträchtigt sein.

Andererseits ermöglicht das Verfahren der binauralen Synthese zur Zeit als Einziges eine gezielte Untersuchung der Abhängigkeit von psychoakustischen Größen von der Geometrie der Lautsprechergruppe und dem Ort im Zuhörerbereich. Daher wird im Rahmen der psychoakustischen Untersuchung der WFS gewinnbringend zu Fragen der Lokalisation und Klangverfärbung einsetzbar sein.

Danksagung

Diese Studie wurde gefördert durch DFG RA 2044/1-1.

Literatur

- [1] Berkhout AJ, de Vries D, Vogel P. J Acoust Soc Am (1993), 2764-78
- [2] Wittek H. University of Surrey, 2007
- [3] Völk F, Faccinelli E, Fastl H. DAGA (2010), 1069-70
- [4] Völk F, Konradl J, Fastl H. J Acoust Soc Am (2008), 1165-70