

Überlegungen zu Möglichkeiten und Grenzen virtueller Wellenfeldsynthese

Florian Völk, Elias Faccinelli, Hugo Fastl

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

Einleitung

Virtuelle Wellenfeldsynthese (VWFS, vgl. Völk et al. [1]) ist ein Verfahren zur dynamischen Berechnung der in Wellenfeldsynthesesenarien auftretenden Schalldrucksignale an den Trommelfellen (Ohrsignale) mittels binauraler Raumsynthese (BRS, vgl. [2]). Dieses Verfahren kann Vorteile insbesondere für Entwicklungsarbeit und psychoakustische Forschung auf dem Gebiet der Wellenfeldsynthese (WFS) bieten. Die technische Realisierbarkeit der VWFS wurde in [1] prinzipiell gezeigt, allerdings sind bislang die Bedingungen unklar, die es zu erfüllen gilt, um tatsächlich eine Simulation realer WFS zu erreichen. In diesem Beitrag wird die VWFS einer systemtheoretischen Analyse unterworfen. Insbesondere liegt hier der Fokus auf den Randbedingungen, die die Gültigkeit der Betrachtungen sicherstellen. Basierend auf den Ergebnissen werden, unter Berücksichtigung elektroakustischer Gesichtspunkte und der auf dem Kirchhoff-Helmholtz-Integral (KHI) aufbauenden Herleitung der WFS (vgl. [3]), Möglichkeiten und Grenzen der VWFS diskutiert.

Systemtheoretische Grundlagen

Signale und Systeme im Zeitbereich werden hier ungeachtet ihres digitalen oder analogen Charakters mittels Klein-, Spektren mittels Großbuchstaben bezeichnet. Alle Messungen wurden mit dem in [4] vorgestellten System durchgeführt. Die Ohrsignale einer Versuchsperson, die von einem Array aus an den Positionen \mathbf{x}_0 befindlichen Lautsprecherboxen beschallt wird, werden als Vektor aus den zu linkem und rechtem Ohrsignal korrespondierenden komplexen Fourierpektren beschrieben (Nomenklatur angelehnt an [3]):

$$\mathbf{P}_e(\mathbf{x}_h, \omega) = \sum_{\mathbf{x}_0} D(\mathbf{x}_0, \omega) \mathbf{H}_{l,s,e}(\mathbf{x}_h, \mathbf{x}_0, \omega) \quad (1)$$

Dabei bezeichnet $D(\mathbf{x}_0, \omega)$ das Fourierspektrum der die Lautsprecherbox an der Position \mathbf{x}_0 treibenden Spannung und $\mathbf{H}_{l,s,e}(\mathbf{x}_h, \mathbf{x}_0, \omega)$ den Vektor der beiden von der Kopfposition \mathbf{x}_h abhängigen Übertragungsfunktionen von der genannten Spannung zu den Ohrsignalen der Versuchsperson. Hier ist zu berücksichtigen, dass die Übertragungsfunktionen exakt die Situation beschreiben, in der sie gemessen wurden. Betreibt man nun Wellenfeldsynthese über das betrachtete Lautsprecherarray, so werden die Lautsprecher mit sogenannten driving signals gespeist, deren Fourierspektren man als driving functions bezeichnet. Anschaulich gesprochen beschreibt Gleichung (1) die Tatsache, dass die im KHI auftretenden Green'schen Funktionen bei VWFS nicht mehr durch physikalisch vorhandene Lautsprecher realisiert werden (vgl. [3]), sondern durch deren in $\mathbf{H}_{l,s,e}(\mathbf{x}_h, \mathbf{x}_0, \omega)$ enthaltene Impulsantworten.

Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens

Neben der Simulation in Hardware realisierbarer WFS-Systeme eröffnen sich mit VWFS weitere Möglichkeiten, die mit realen Aufbauten nicht erreichbar wären. Beide Situationen werden im Folgenden diskutiert.

Simulation realer Wellenfeldsynthesensysteme

Für die Synthese der bei WFS auftretenden Ohrsignale mittels VWFS ist zu berücksichtigen, dass das von einer Lautsprecherbox erzeugte Schallfeld durch Reflexionen an weiteren Boxen verändert wird. Beispielhaft wird hier die Gesamtübertragungsfunktion einer linearen Anordnung von sechs direkt nebeneinander positionierten Breitbandlautsprecherboxen mit quadratischer Frontfläche (Kantenlänge 7.9cm) betrachtet. Diese Übertragungsfunktion wurde einmal direkt gemessen und zweimal durch lineare Superposition der einzelnen Lautsprecherimpulsantworten berechnet, wobei einmal die jeweils anderen Lautsprecher zur Messung entfernt wurden, beim anderen mal alle Lautsprecher bei jeder Messung in Ihrer Position verblieben. Abbildung 1 zeigt die Differenzen der Übertragungsmaße jeweils einer der beiden Superpositionen und der Gesamtmessung.

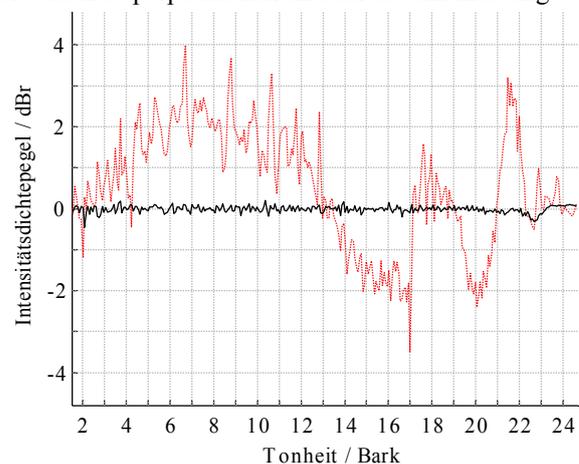


Abbildung 1: Differenzen der Übertragungsmaße eines linearen Lautsprecherarrays zwischen Messung des gesamten Arrays und Superposition der einzelnen Lautsprecherimpulsantworten, letztere einmal in Anwesenheit (schwarz durchgezogen), einmal in Abwesenheit (rot gepunktet) der jeweils anderen Lautsprecher gemessen.

Es ist offensichtlich, dass die beim üblichen Betrieb des Wellenfeldsynthesearrays auftretenden Reflexionen nicht in der durch Superposition der bei Abwesenheit der jeweils anderen Lautsprecher gemessenen Einzelimpulsantworten erhaltenen Systembeschreibung enthalten sind. Daher weicht das so berechnete Übertragungsmaß vom im Betriebsfall gemessenen Gesamtübertragungsmaß des Arrays ab (Differenz rot gepunktet in Abbildung 1).

Werden zwei oder mehrere benachbarte Lautsprecher simultan betrieben, ändert sich der Wellenwiderstand des umgebenden Mediums und damit die Belastung der Lautsprecher im Vergleich zum alleinigen Betrieb jeweils eines einzelnen. Von entscheidender Bedeutung für die Anwendbarkeit der VWFS für die Nachbildung realer Systeme ist, ob sich durch die veränderte Belastung im Falle der realen WFS das Verhalten der einzelnen Lautsprecher ändert. Träte solch eine wechselseitige Beeinflussung auf, wäre das Gesamtsystem aller Lautsprecher zeitvariant, wodurch VWFS nicht mehr in der Lage wäre, reale WFS zu simulieren. Grundvorausset-

zung für die Nachbildung der realen WFS ist daher, dass sich eine Veränderung des Wellenwiderstands, der die einzelnen Lautsprecher belastet, nicht auf deren Betriebsverhalten auswirkt. Modelliert man die betrachtete Situation basierend auf [5], so kann durch elektrische Simulation gezeigt werden, dass das Betriebsverhalten von Lautsprechern mit geringem Wirkungsgrad bei veränderter Belastung weitgehend konstant bleibt. Veranschaulichend führt die starke Fehlanpassung des Lautsprechers an das Medium Luft dazu, dass die von einem benachbarten Lautsprecher auf den betrachteten einfallende Wirkleistung nahezu vollständig reflektiert wird. Dies konnte sowohl durch elektrische Messungen der Eingangsimpedanz der hier betrachteten Lautsprecher (Wirkungsgrad etwa 0.2%), als auch durch Messungen im resultierenden Schallfeld bestätigt werden. Die dunkle Kurve in Abbildung 1 zeigt die verschwindend geringe Differenz zwischen der Gesamtübertragungsfunktion mehrerer Lautsprecher und der durch Superposition der Einzelimpulsantworten berechneten. Abb. 2 stellt die Differenzen der Realteile der Eingangsimpedanzen des Lautsprechers bei Einzelmessung und gemessen bei gleichzeitigem Betrieb eines zweiten dar (schwarz durchgezogen: in Phase, rot gepunktet: Phasenlage 180°).

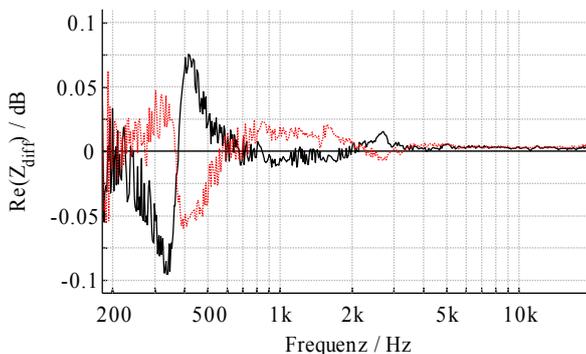


Abbildung 2: Differenz der Realteile der Eingangsimpedanz eines Lautsprechers, gemessen alleine und bei gleichzeitigem Betrieb eines benachbarten Lautsprechers (LS2). Schwarz durchgezogen: LS2 in Phase, rot gepunktet: Phase von LS2 um 180° gedreht.

Da sich die Kurven invers verhalten, können Messfehler weitgehend ausgeschlossen werden. Die Messung bestätigt somit ebenfalls geringe wechselseitige Einflüsse kleiner als 0.1dB (im Realteil der Lautsprechereingangsimpedanz).

Weiterführende Möglichkeiten

Bei der Realisierung traditionell berechneter WFS ist es üblich, die sich in der Herleitung mathematisch als Schallquellen ergebenden Green'schen Funktionen durch Lautsprecher anzunähern (vgl. [3]). Im einfachsten Fall ergeben sich als für die Realisierung der Green'schen Funktionen notwendige Schallquellen Monopolquellen in reflexionsfreier Umgebung. Da Lautsprecher mit Monopolcharakteristik im gesamten hörbaren Frequenzbereich jedoch nicht realisierbar sind, ergeben sich v. a. durch die bei hohen Frequenzen zunehmend einsetzende Bündelung Fehler im synthetisierten Schallfeld. Durch Anpassung der Synthesegleichung an die verwendeten Lautsprecher ist es möglich, diese Fehler zu reduzieren (vgl. [6]), was u. a. identisches Abstrahlverhalten aller verwendeten Lautsprecher voraussetzt. Diese Bedingung ist mit virtueller Wellenfeldsynthese, insbesondere für reflexionsarme Umgebungen, leicht zu erfüllen. Es ist

weiterhin möglich, bei der Herleitung der Wellenfeldsynthesegleichungen durch Wahl möglichst geeigneter Green'scher Funktionen die notwendigen Näherungen auf ein Minimum zu reduzieren. Solche Green'schen Funktionen sind jedoch häufig schwer oder gar nicht real implementierbar. Virtuelle Wellenfeldsynthese eröffnet hier Möglichkeiten, die im realen Fall nicht denkbar wären. Mit modellbasierten Verfahren zur Synthese der notwendigen Impulsantworten können in der Realität nicht realisierbare Situationen implementiert werden. In Kombination mit geeigneten Green'schen Funktionen könnten dadurch die bei der Herleitung der Wellenfeldsynthesegleichungen notwendigen Näherungen reduziert werden. Hier ist aktueller Forschungsbedarf gegeben.

Über die erwähnten Möglichkeiten hinaus werden mit VWFS sehr geringe Lautsprecherabstände trotz endlicher Lautsprecherabmessungen möglich. Da im realen Fall ein Wellenfeld nur bis zu einer oberen Grenzfrequenz, ab der das sogenannte örtliche Aliasing auftritt, korrekt nachgebildet werden kann, versucht man möglichst kleine Lautsprecher zu verwenden, um die Aliasfrequenz hoch zu halten, was jedoch aus physikalischen Gründen Kompromisse beim Übertragungsverhalten der Lautsprecher erforderlich macht. Mit virtueller Wellenfeldsynthese verschwindet diese Restriktion, wobei allerdings ein in der Realität nicht realisierbares System simuliert wird, was für Forschung und Spezialanwendungen jedoch durchaus sinnvoll sein kann.

Zusammenfassung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Messungen zeigen, dass die Interaktionen dynamischer Lautsprecher mit geringem Wirkungsgrad bei der Wellenfeldsynthese vernachlässigbar sind. Diese Tatsache stellt gleichzeitig eine Grundvoraussetzung für die Anwendbarkeit der virtuellen Wellenfeldsynthese – der Simulation von Wellenfeldsynthese mittels Binauraltechnik – dar. Weiterhin wurde gezeigt, dass die für VWFS nötigen Lautsprecherimpulsantworten bei Anwesenheit des gesamten zu synthetisierenden Hardwareaufbaus gemessen werden müssen, wenn reale WFS nachgebildet werden soll. Über die Simulation realisierbarer Systeme hinaus eröffnet die VWFS Möglichkeiten in Entwicklung und Forschung, die mit WFS nicht umsetzbar wären.

Danksagung

Die Autoren danken der BOSE GmbH und der Sound Service GmbH/Samson Tech. für die Unterstützung beim Aufbau des Lautsprecherarrays sowie Prof. Dr.-Ing. M. Zollner für die Unterstützung bei der Betrachtung des Lautsprecher-Verhaltens. Die Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projekts FA 140/4 gefördert.

Literatur

- [1] Völk, F.; Konrad, J.; Fastl, H.: Simulation of wave field synthesis. Proc. of Acoustics 08, 1165-1170, Abstract in J. Acoust. Soc. Am. **123**, 3159 (2008)
- [2] Møller, H.: Fundamentals of Binaural Technology. Appl. Acoustics **36**, 171-218 (1992)
- [3] Spors, S.; Rabenstein, R.; Ahrens, J.: The Theory of Wave Field Synthesis Revisited. 124th AES Conv. (2008)
- [4] Völk, F.; Straubinger, M.; Roalter, L.; Fastl, H.: Measurement of HRIRs for Psychoacoustic Research. Fortschritte der Akustik, DAGA '09, DEGA e. V., Berlin (2009)
- [5] Zollner, M.; Zwicker, E.: *Elektroakustik*. 3. Auflage, Springer, Berlin (1993)
- [6] Ahrens, J.; Spors, S.: Sound Field Reproduction Employing Non-Omnidirectional Loudspeakers. 126th AES Conv. (2009)