

Raumakustische Simulation mit der BEM am Beispiel des Musikaufnahmestudios der Physikalisch Technischen Bundesanstalt

Andreas Franck¹, Ingo Witew¹, Michael Vorländer¹, Stefan Schneider², Steffen Marburg³

¹ *Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen, Neustraße 50, D-52066 Aachen, Deutschland*

² *LMA CNRS, 31 chemin Joseph-Aiguier, F-13402 Marseille cedex 20, Frankreich*

³ *Institut für Festkörpermechanik, Technische Universität, D-01062 Dresden, Email: marburg@ifkm.mw.tu-dresden.de*

Einleitung

In der Zeit zwischen 1994 und 2002 wurde von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig ein dreiphasiger Benchmarktest (Round robin) zur raumakustischen Simulation veranstaltet. In der dritten Phase wurde das Musikaufnahmestudio der PTB betrachtet. Der Test wurde im Sommer 2002 abgeschlossen und die wesentlichen Ergebnisse in einer Arbeit von Bork [1] publiziert. Weitere Ergebnisse findet man im Internet unter <http://www.ptb.de/en/org/1/14/1401>.

Für die vorliegende Arbeit wird der Versuch unternommen, mittels eines numerischen Verfahrens zur Lösung der Helmholtz-Gleichung raumakustische Parameter wie Stärkemaß G und Nachhallzeit T_{30} zu bestimmen. Da konventionelle Verfahren häufig im sogenannten mittleren Frequenzbereich nicht mehr wirkungsvoll eingesetzt werden können, wurde hierfür ein schnelles Verfahren der BEM (*Fast BEM*) gewählt. Es handelt sich um das MLFMA-Verfahren (*Multilevel fast multipole analysis*), welches in den letzten Jahren soweit entwickelt wurde, das es auch für praktisch relevante Problemstellungen eingesetzt werden kann, siehe z.B. [2–7].

Das Musikaufnahmestudio wurde mit dem (nichtkommerziellen) Programm AKUSTA berechnet. Darin ist auch eine Variante des MLFMA Algorithmus umgesetzt. In diesem Beitrag seien erste Ergebnisse bis hin zur Ermittlung raumakustischer Größen vorgestellt. Diese werde mit experimentell ermittelten Daten sowie mit Ergebnissen des Programms CAESAR, siehe z.B. [8,9], verglichen.

Simulationsmodell

Das Berechnungsmodell basiert im wesentlichen auf den Daten, die für die dritte Phase des Round Robin bereitgestellt wurden. Da als Randbedingung lediglich ein Absorptionsgrad α angegeben war, wurde dieser in eine reelle Wandadmittanz umgewandelt, die als Robin'sche Randbedingung ins Berechnungsmodell eingeht. Diese (dimensionslose reelle) Admittanz \tilde{Y} ergibt sich aus

$$|\tilde{Y}| = \frac{1 - \sqrt{1 - \alpha}}{1 + \sqrt{1 - \alpha}}. \quad (1)$$

Eine weitere Vereinfachung im Modell besteht darin, daß die Vorhänge im geschlossenen Zustand auf den Fensterscheiben liegen.

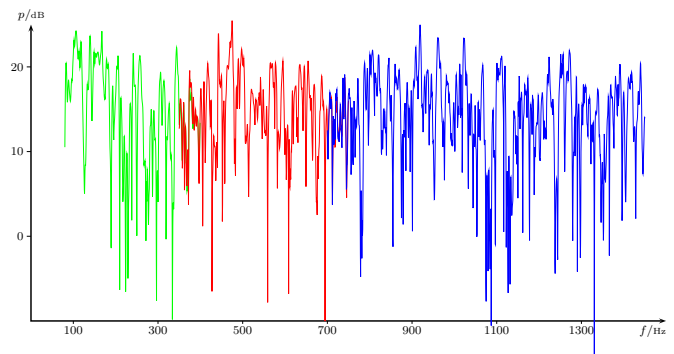


Abbildung 1: Beispiel für eine Transferfunktion

Es wurden drei Randelementenetze erzeugt. In ihnen wird die maximale Elementgröße auf 20 cm (9169 Elemente, grobes Modell), 10 cm (35553 El., mittleres Modell) und 6 cm (98424 El., feines Modell) festgelegt. Aufgrund früherer Arbeiten [10,11] wurden konstante Randelemente gewählt, weil diese am robustesten erscheinen. Bei einer Schallgeschwindigkeit von 343.4 ms^{-1} wurde das grobe Modell bis 400 Hz, das mittlere Modell bis 720 Hz und das feine Modell bis 1450 Hz verwendet. Die zu erwartenden Ergebnisse sind in diesem Frequenzbereich als (numerisch) verlässliche Ergebnisse anzusehen, auch wenn im Übergangsbereich nur noch etwa 4 konstante Elemente pro akustischer Wellenlänge genutzt werden. Durch die Robustheit der konstanten Elemente können die Ergebnisse jedoch im numerischen Sinne immer noch als zuverlässig gelten, was sich zum Beispiel darin widerspiegelt, daß in Frequenzbereichüberlappungen nahezu identische Ergebnisse erzeugt wurden.

Analysiert wurden der Frequenzbereich von 80–400 Hz (grobtes Netz) und der von 350–720 Hz (mittleres Netz) in Schritten von 0.1 Hz sowie der Bereich von 700–1450 Hz (feines Netz) in Schritten von 0.5 Hz. Dies geschah für offene und geschlossene Vorhänge und für jeweils zwei unterschiedliche Anregungspunkte, also insgesamt vier komplette Berechnungen über den gesamten Frequenzbereich, was allein schon etwa 6000 Einzelberechnungen des feinen Modells entspricht. Ausgewertet wurden jeweils drei Empfängerpositionen.

Raumakustische Kenngrößen wurden jeweils für einzelne Oktavbänder berechnet, speziell für die Oktavmittenfrequenzen von 125, 250, 500 und 1000 Hz. Für das Stärkemaß G wurden die BEM-Ergebnisse gemittelt, für

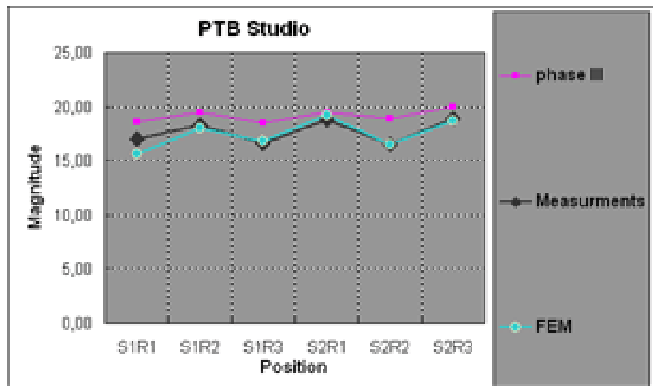


Abbildung 2: Stärkemaß G bei geschlossenen Vorhängen, Oktave: 250 Hz (phase III = Berechnung mit CAESAR)

die Nachhallzeit T_{30} in den Zeitbereich transformiert und entsprechend ausgewertet.

Ergebnisse der BEM-Rechnung

Die Berechnungen erzeugten riesige Datenmengen, von denen der Großteil für diese Studie nicht benötigt wird. Gespeichert wurden letztlich nur die Transferfunktionen zwischen den zwei Quellen und den drei Empfängern. Ein Beispiel für eine derartige Übertragungsfunktion zeigt Abbildung 1. Aufgrund der vielen Maxima und Minima dieser Funktion ist sie derart detailliert für die raumakustische Beurteilung nahezu wertlos.

Nach der Mittelung im Oktavband bzw. der Transformation in den Zeitbereich für die Signale des jeweiligen Oktavbandes ergaben sich Werte für raumakustische Kenngrößen, wobei hierin insbesondere auf das Stärkemaß G und die Nachhallzeit T_{30} eingegangen werden soll. Allerdings stellt sich die Beurteilung der Ergebnisse als sehr ambivalent dar: So gibt es Oktaven, bei denen mit Hilfe des BE-Modells praktisch exakt die Meßergebnisse reproduziert werden konnten, vgl. Abbildung 2, aber auch andere Konfigurationen, in denen die hier ermittelten Ergebnisse relativ deutlich von den Meßergebnissen und auch denen des Programms CAESAR abwichen. Diese Abweichungen konnten in unterschiedlichen Konfigurationen in allen vier betrachteten Oktaven auftreten, wobei sie in der Nachhallzeit deutlicher und im allgemeinen durch eine offenbar systematische Unterschätzung wahrgenommen werden konnten. Gründe hierfür sind vermutlich in den unzureichend genau eingebrachten Randbedingungen zu suchen. Es ist geplant, das Modell mit komplexen Wandadmittanzen zu analysieren und entsprechend anzupassen.

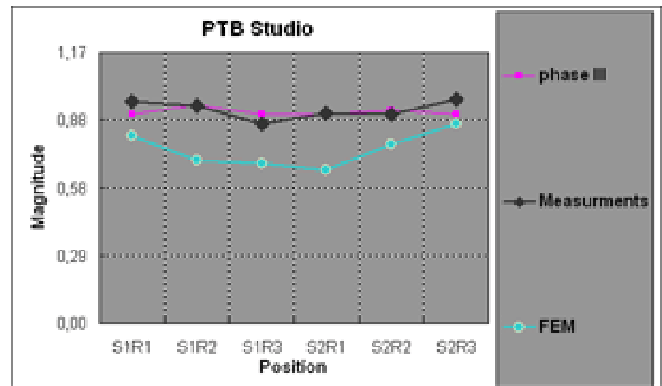


Abbildung 3: Nachhallzeit T_{30} bei offenen Vorhängen, Oktave: 125 Hz (phase III = Berechnung mit CAESAR)

Literatur

- [1] I. Bork. Simulation and measurement of auditorium acoustics. – The round robins on room acoustical simulation. Proceedings of the Institute of Acoustics (2002)
- [2] M. Fischer, U. Gauger und L. Gaul. A multipole galerkin boundary element method for acoustics. *Engineering Analysis with Boundary Elements* 28 (2004) S. 155–162
- [3] T. Sakuma und Y. Yasuda. Fast multipole boundary element method for large-scale steady-state sound field analysis, part i: Setup & validation. *Acustica/Acta Acustica* 88 (2002) S. 513–525
- [4] Y. Yasuda und T. Sakuma. Fast multipole boundary element method for large-scale steady-state sound field analysis, part ii: Examination of numerical items. *Acustica/Acta Acustica*, 89 (2003) S. 28–38
- [5] S. Schneider. Application of fast methods for acoustic scattering and radiation problems. *Journal of Computational Acoustics* 11 (2003), Nr. 3, S. 387–401
- [6] S. Marburg und S. Schneider. Performance of iterative solvers for acoustic problems. Part I: Solvers and effect of diagonal preconditioning. In: *Engineering Analysis with Boundary Elements* 27 (2003), Nr. 7, S. 727–750
- [7] S. Schneider und S. Marburg. Performance of iterative solvers for acoustic problems. Part II: Acceleration by ILU-type preconditioner. In: *Engineering Analysis with Boundary Elements* 27 (2003), Nr. 7, S. 751–757
- [8] M. Vorländer. Simulation of the transient and steady state sound propagation in rooms using a new combined sound particle - image source algorithm. *Journal of the Acoustical Society of America* 86, S. 172–178, 1989.
- [9] O. Schmitz, S. Feistel, W. Ahnert und M. Vorländer. Grundlagen raumakustischer Rechenverfahren und ihre Validierung. *Fortschritte der Akustik-DAGA2001*, Hamburg-Harburg, S. 24–25, 2001
- [10] S. Marburg. Six elements per wavelength. Is that enough? *Journal of Computational Acoustics*, 10 (2002), Nr. 1, S. 25–51
- [11] S. Marburg und S. Schneider. Influence of Element Types on Numeric Error for Acoustic Boundary Elements. In: *Journal of Computational Acoustics* 11 (2003), Nr. 3, S. 363–386
- [12] M. Vorländer. Geometrische Akustik in kleinen Räumen? *Fortschritte der Akustik – DAGA 2002*, Bochum, S. 596–597, 2002