

# Berechnung des Schallfeldes in der Deutschen Oper Berlin mit Raytracing und der Finiten-Elemente-Methode

Jan Michael Kimmich<sup>1</sup>, Stefan Frank<sup>1</sup>, Anton Schlesinger<sup>2</sup>, Martin Ochmann<sup>2</sup>, Martin Tschakner<sup>2</sup>

<sup>1</sup> HTW Berlin, Fachbereich 2 - Ingenieurwissenschaften, E-Mail: JanMichael.Kimmich@htw-berlin.de

<sup>2</sup> Beuth Hochschule für Technik Berlin, Fachbereich II, Projektgruppe Computational Acoustics

## Einleitung

In Opernhäusern wird die Raumakustik durch die Kopplung dreier Räume, des Bühnenhauses, des Orchestergrabens und des Zuschauerraums, bestimmt. Im Projekt SIMOPERA soll die Raumakustik am Beispiel der Deutschen Oper Berlin simuliert und optimiert werden. Eine Optimierung der Raumakustik ist notwendig, da im Orchestergraben hohe Schalldruckpegel problematisch für die Gesundheit des Orchesters sein können. Um die Schallfelder in allen Teilräumen berechnen zu können, ist der Einsatz mehrerer Simulationsverfahren notwendig. Mit Methoden der geometrischen Akustik, wie dem Raytracing, kann die Schallausbreitung oberhalb der Schröderfrequenz simuliert werden. Im Orchestergraben spielt jedoch das modale Schallfeld eine entscheidende Rolle. Dieses kann nur mit wellenbasierten Simulationsverfahren, wie z.B. der Finiten-Elemente-Methode (FEM), berechnet werden. Im Rahmen des Projektes sollen daher verschiedene Verfahren eingesetzt und miteinander sowie mit begleitenden Messungen verglichen werden.

In der Literatur wird einerseits darauf hingewiesen, dass eine verbesserte akustische Transparenz durch tieffrequente Absorption zu einem leiseren Spielen bei MusikerInnen führen, und dadurch die Belastung des Orchesters durch hohe Schalldruckpegel reduziert werden kann [1]. Andere Autoren verweisen auf Messungen, bei denen das Anbringen von Absorbern in Orchestergräben zu einer geringeren frühen Unterstützung  $ST_{\text{early}}$  bei gleichbleibendem Stärkemaß  $G$  nach [2] geführt hat [3].

Um gezielte Maßnahmen entwickeln zu können, welche gleichzeitig eine gute gegenseitige Hörbarkeit bei möglichst geringer Belastung durch hohe Schalldruckpegel ermöglichen, sollen im Rahmen des Projektes Berechnungen des Schallfeldes im Orchestergraben durchgeführt werden. Im ersten Projektabschnitt wurde ein Modell zur Simulation mit Methoden der geometrischen Akustik erstellt. Zudem wurden Simulationen für den entkoppelten Orchestergraben mit der FEM und Raytracing durchgeführt. Die Ergebnisse der begleitenden raumakustischen Messungen in der Deutschen Oper Berlin sind in [4] zu finden.

## Schallfeld im Orchestergraben

Der Orchestergraben der Deutschen Oper Berlin ist in Abbildung 1 zusehen. Die Grundfläche beträgt ca.  $150\text{ m}^2$ . Eine Fläche von  $33\text{ m}^2$  liegt unter der Bühne und wird durch den Souffleurkasten in zwei Bereiche getrennt.

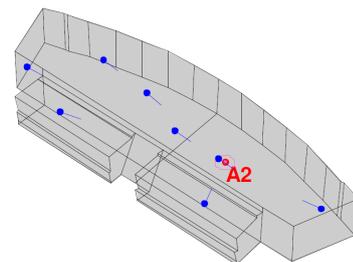
Dieser Bereich wird im Folgenden als Überhang bezeichnet. Die meist genutzte Stellung des fahrbaren Grabens liegt  $2,9\text{ m}$  unter Bühnenniveau. Die Berandung besteht aus Holz an der dem Publikum zugewandten Seite und an der Rückseite. Die seitlichen Begrenzungsflächen sind betonierte Wände. Rückseite und Decke der Überhänge weisen eine Neigung gegenüber dem Boden auf, um die Ausbildung von axialen Raummoden zu unterdrücken.



**Abbildung 1:** Orchestergraben der Deutschen Oper Berlin. Im hinteren Bereich ist der Überhang zu sehen.

Zur Berechnung des Schallfeldes wurde ein Modell des Grabens erstellt, welches in Abbildung 2 zu sehen ist. Dazu wurde der Graben vom restlichen Raum entkoppelt. Die Anregung findet in CATT-Acoustic mit einer ungerichteten Quelle A2 statt, die einen Schalldruckpegel  $L_p = 90\text{ dB}$  in einem Meter Entfernung im Freifeld erzeugt. Im Graben sind sieben virtuelle Empfänger zur Auswertung des Schalldruckpegels verteilt. In CATT-Acoustic wurden die schallharten Wände mit einem Streugrad von  $0,1$  belegt und die Simulation mit Algorithmus 2 mittels Ray-Splitup durchgeführt.

In COMSOL wurde am selben Ort eine Monopolquelle definiert. Für die Berechnung wurden alle Wände als schallhart betrachtet. Auf der oberen Begrenzungsfläche wurde die Randbedingung  $Z = \rho c$  vorgegeben.

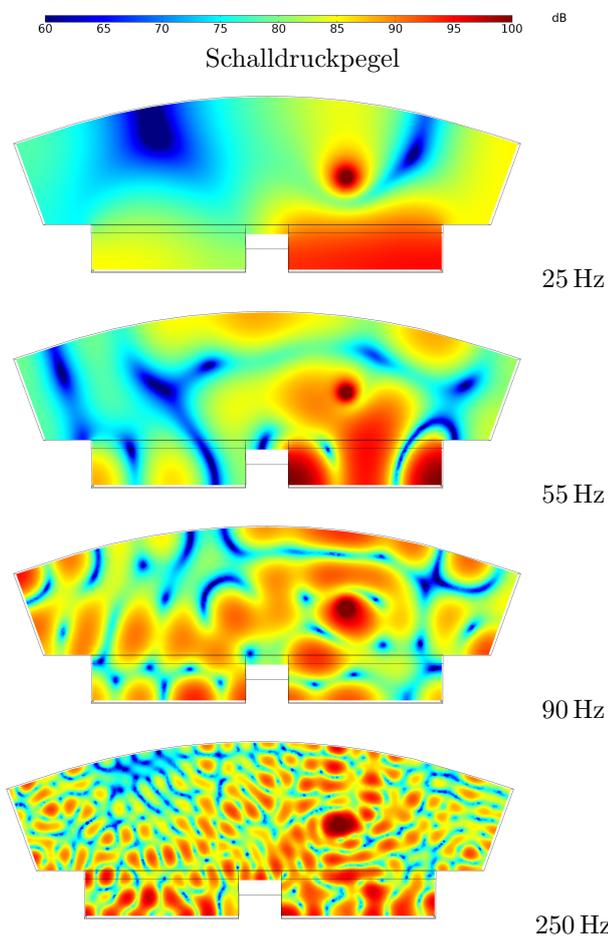


**Abbildung 2:** Modell des Orchestergrabens der Deutschen Oper Berlin mit Quelle A2 und sieben Empfängerpositionen.

## Berechnung mit der FEM

Die Berechnung mit der FEM in COMSOL wurde im Frequenzbereich von 5 - 710 Hz mit tetraedrischen Elementen durchgeführt. Im Frequenzbereich von 5 - 500 Hz wurden minimal sechs Elemente pro Wellenlänge verwendet. Zwischen 500 - 710 Hz konnte eine Berechnung nur mit vier Elementen pro Wellenlänge erfolgen. In Abbildung 3 ist die Schalldruckpegelverteilung auf einer Ebene in 1,5 m Höhe über dem Boden des Grabens zu sehen. Diese entspricht in etwa der Ohrhöhe zwischen stehenden und sitzenden MusikerInnen.

Insbesondere im Bereich des Überhanges zeigen sich deutliche Erhöhungen des Schalldruckpegels für 25 Hz in Abbildung 3. Ursächlich scheinen vor allem Axialmoden zwischen den beiden parallelen Wänden des Überhanges zu sein. Da die Decken in diesem Bereich dem Boden gegenüber geneigt sind, werden Axialmoden zwischen Decke und Boden unterdrückt.

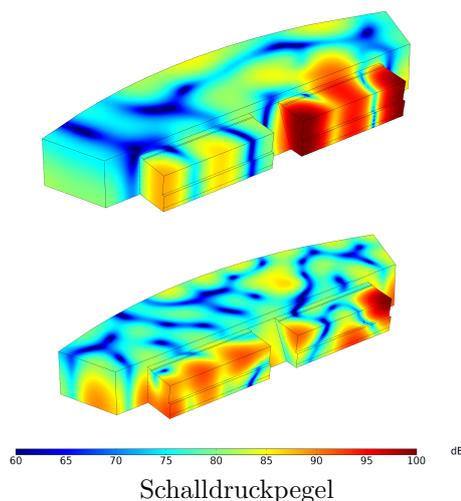


**Abbildung 3:** Schalldruckpegelverteilung für 25, 55, 90 und 250 Hz von oben nach unten. Die Verteilung ist auf einem Schnitt in 1,5 m Höhe über dem Boden dargestellt. Berechnet mit COMSOL Multiphysics 5.3a.

Die Schalldruckpegelverteilungen für 55 Hz, 90 Hz in Abbildung 3 und für 55 Hz und 80 Hz in Abbildung 4 zeigen Schalldruckpegelmaxima entlang von Ecken und Kanten des Grabens. Diese deuten auf kompliziertere Raummoden hin.

Um gezielte Maßnahmen zur Verbesserung der akustischen Transparenz entwickeln zu können, soll dieses Modell als Basis weiterer Untersuchungen dienen. Im Weiteren werden die Abhängigkeit der Schalldruckpegelverteilung von der Anregungsposition und von den Wandimpedanzen genauer betrachtet. Gelingt es das Modell mit begleitenden Messungen zu validieren, so können verschiedene Maßnahmen zur Dämpfung der Raummoden simuliert werden. Eine Untersuchung optimaler Anbringungsorte für Platten- und Helmholtzresonatoren kann dann erfolgen.

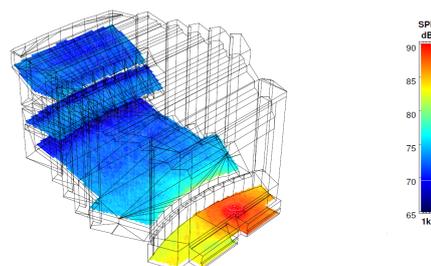
Zur Verbesserung des Modells selbst sollen weitere absorbierende Randbedingungen mittels Perfectly Matched Layer und FEM-BEM-Kopplung [5] untersucht werden.



**Abbildung 4:** Schalldruckpegelverteilung für 55 Hz oben und 80 Hz unten auf der Berandung des Orchestergrabens.

## Schallfeld im Gesamtraum

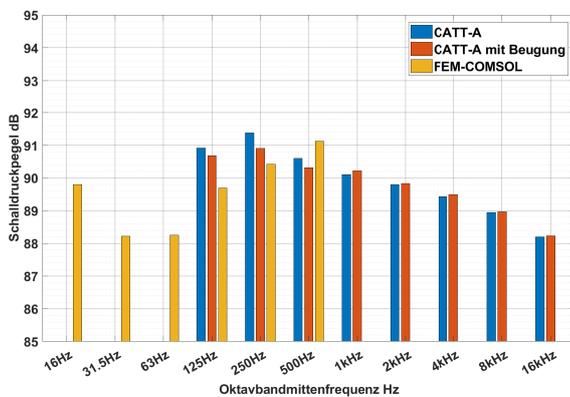
Um die Auswirkungen von akustischen Maßnahmen im Orchestergraben auf die Raumakustik im Zuschauerraum untersuchen zu können, wird auch das Schallfeld im Gesamtraum untersucht. Ein Modell für den Gesamtraum wurde in CATT-Acoustic erstellt. Die Absorptionsgrade dazu wurden aus [6] abgeschätzt und die Nachhallzeit  $T_{30}$  an die in [4] gemessene Nachhallzeit bei geschlossenem eisernen Vorhang angepasst. In Abbildung 5 ist die Schalldruckpegelverteilung auf den Publikumsflächen bei Anregung des Raumes mit einer Quelle im Orchestergraben zu sehen.



**Abbildung 5:** Simulierte Schalldruckpegelverteilung bei 1 kHz für eine Quelle A2 im Orchestergraben. Berechnung mit CATT-Acoustic TUCT v2.0b:1.03,  $4,28 \cdot 10^5$  Strahlen,  $t=2$  s.

## Oktavpegel aus FEM und Raytracing

In Abbildung 6 sind die über alle acht Empfängerpositionen gemittelten Schalldruckpegel in Oktaven aus CATT-Acoustic mit und ohne Berücksichtigung von Beugung dargestellt. Für den entkoppelten Orchestergraben liegt die Schröderfrequenz, berechnet in CATT-Acoustic mit absorbierender oberer Begrenzungsfläche, bei etwa 95 Hz. Daher liegt erst das 250 Hz-Band im Bereich, der mit Methoden der geometrischen Akustik untersucht werden kann. CATT-Acoustic gibt erst das 500 Hz-Band als belastbar an. Bei Berücksichtigung von Beugung liegen die Werte in den Oktavbändern für das 500 Hz-Band und für die beiden Bänder darunter um maximal 0,5 dB tiefer im Vergleich zur Simulation ohne Berücksichtigung von Beugung. Für die Bänder darüber sind die Werte dagegen um maximal 0,1 dB höher.



**Abbildung 6:** Schalldruckpegel in Oktavbändern im Orchestergraben mit CATT-Acoustic ohne Beugung und mit Beugung berechnet sowie gemittelte Pegel aus COMSOL.

Um die Schalldruckpegel aus der FEM in COMSOL zu den mit CATT-Acoustic berechneten in Beziehung setzen zu können, wurden auch diese über alle Empfängerpositionen gemittelt. Daraus wurde für jedes Oktavband  $k$  ein gemittelter Oktavpegel nach

$$\bar{L}_{O,k} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right) \quad (1)$$

aus den Werten der FEM berechnet. An einer energetisch korrekten Berechnung zum Vergleich beider Verfahren wird gearbeitet. Die nach (1) berechneten Werte zeigen gegenüber den Werten aus CATT-Acoustic eine Abweichung von maximal 1,2 dB.

## Ausblick

Im weiteren Verlauf des Projektes sollen zur Durchführung von Simulationen mit realistischen Randbedingungen die Absorptionsgrade von Wandvertäfelung, Bestuhlung und Berandung des Orchestergrabens bestimmt werden.

An einem Modellraum mit einfachen, bekannten Randbedingungen soll an einem Vergleich zwischen Simulationsmethoden der geometrischen Akustik und der Wellenakustik gearbeitet werden und eine Validierung durch raumakustische Messungen erfolgen.

Eine FEM-Simulation soll im tieffrequenten Bereich auch für den angekoppelten Zuschauerraum und das Bühnenhaus erfolgen.

In der Beuth-CAVE ist eine Auralisierung der Deutschen Oper Berlin zur Evaluierung unterschiedlicher raumakustischer Verbesserungsszenarien im Orchestergraben geplant.

## Danksagung

Wir danken unseren Projektpartnern Deutsche Oper Berlin und wax GmbH für ihre Unterstützung bei der Durchführung des Projektes.

Gefördert durch das Institut für angewandte Forschung



## Literatur

- [1] Drotleff, H., Zha, X., Fuchs, H. V., Leistner, M.: Acoustic improvements of the working condition for musicians in orchestra pits. In: Fortschritte der Akustik - CFA/DAGA 2004, Straßburg, Frankreich, 2004, 525-526.
- [2] DIN EN ISO 3382-1: Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 1: Aufführungsräume. 2009.
- [3] Gade, A. C., Kapenekas, J., Andersson, B. T., Gustafsson, J. I.: Acoustical Problems in Orchestra Pits; Causes and Possible Solutions. In: Proceedings of 17th International Congress on Acoustics, Rome, Italy, 2-7 September, 2001, 306-307.
- [4] Schlesinger, A., Kimmich, J. M., Ochmann, M., Frank, S.: Messtechnische Untersuchung der Raumakustik der Deutschen Oper Berlin. In: Fortschritte der Akustik - DAGA 2018, München, Deutschland, 2018.
- [5] Ochmann, M., Lippert, S., von Estorff, O.: Numerische Methoden der Technischen Akustik. In: Müller, G., Möser, M. (Hrsg.): Fachwissen Technische Akustik, Springer Vieweg, Berlin, 2017.
- [6] Cremer, L., Nutsch, J., Zemke, H. J.: Die akustischen Maßnahmen beim Wiederaufbau der Deutschen Oper Berlin. *Acustica* 12, 1962, 428-433.