

Messtechnische Untersuchung der Raumakustik der Deutschen Oper Berlin

Anton Schlesinger¹, Jan Michael Kimmich², Stefan Frank² und Martin Ochmann¹

¹*Beuth Hochschule für Technik, Fachbereich II, Projektgruppe Computational Acoustics*

Email: anton.schlesinger@beuth-hochschule.de

²*HTW Berlin, Fachbereich II - Ingenieurwissenschaften*

Einleitung

Die Forderung der Begrenzung von Gesundheitsrisiken durch hohe Schalldruckpegel, welche in der EU-Richtlinie 2003/10/EG festgeschrieben wurde, betrifft die Mehrzahl der europäischen Opernhäuser und soll die Arbeitsbedingungen der Orchestermusiker im Operngraben verbessern.

Um die Situation an der Deutschen Oper Berlin (DOB) in Charlottenburg zu beschreiben und Verbesserungsvorschläge zu erarbeiten, wurde das Projekt SIMOPERA – Simulation und Optimierung raumakustischer Felder am Beispiel der DOB – initiiert.

Begleitend zur Messung der Schallexpositionspegel von Musikern in unterschiedlichen Aufführungen und an unterschiedlichen Orten, wird die raumakustische Situation erfasst. Diese Messungen ermöglichen zunächst den Vergleich mit den frühen Planungen und Untersuchungen von Cremer et al. aus dem Jahr 1962 während der Konstruktionsphase und weiteren Opernhäusern [1]. Die Messergebnisse dienen zweitens zur Konservierung der für hervorragend befundenen Akustik des großen, aufgefächerten Zuschauerraums bei künftigen baulichen Vorschlägen zur Verringerung des Schalldruckpegels im Orchestergraben.

Den im diesjährigen DAGA-Beitrag „Berechnung des Schallfeldes in der Deutschen Oper Berlin mit Raytracing und der Finiten-Elemente-Methode“ von Kimmich et al. verwendeten Berechnungsmodellen, dienen die raumakustischen Messergebnisse als Eingabegrößen [2].

Vergleichbare Arbeiten zeigen, dass ein verbesserter akustischer Kontakt unter den Musikern im Orchestergraben zu einer leiseren, differenzierteren Spielweise führen kann, ohne die Dynamik zu beeinträchtigen. In Übereinstimmung mit dieser Erkenntnis ist es ein Ziel dieses Projekts, die wechselseitige Hörbarkeit der Musiker zu erhöhen.

Messaufbau

Zustand während der Messungen

Die hier vorgestellten Untersuchungen beschreiben den leeren Besetzungszustand. Die Temperatur und relative Luftfeuchte betragen 20 bis 27°C bzw. 40 bis 50%. Impulsantworten wurden mit geöffnetem und geschlossenem eisernen Vorhang (Sicherheitsvorhang) durchgeführt. Die Messungen werden entsprechend mit „EO“ für eiserner Vorhang offen und „EG“ für eiserner Vorhang geschlossen gekennzeichnet. Das Volumen des Zuschauerraums mit Orchestergraben beträgt 11400 m³. Das Volumen

des Bühnenhauses beträgt 17400 m³. Die DOB verfügt über fast 1900 Sitzplätze. Die Polsterbestuhlung besitzt einen akustisch porösen Bezug. Der Gesamtraum ist fast vollständig mit Holzbeplankung ausgekleidet. Weitere Angaben zur Ausstattung des unter Denkmalschutz stehenden Gebäudes können bei Cremer et al. gefunden werden [1].

Da die Werkstoffe der Grenzflächen des Zuschauerraums nicht gleichverteilt sind, kann vermutet werden, dass der Raum ortsabhängige Nachhallzeiten aufweist.

Zum Jahreswechsel 2017/18 wurde für Wartungsarbeiten im vorderen Teil des Zuschauerraums ein raumüberspannender Reflektor der abgehängenen Decke geöffnet. Es ist möglich, dass diese Öffnung die in diesem Artikel gemessenen raumakustischen Parameter beeinflusste.

Während den Messungen befanden sich keine Kulissen auf der Bühne. Das Bühnenhaus war etwa zu 1/5 der Oberfläche mit Bühnenvorhängen verkleidet. Der Orchestergraben war in jeder Messung in der Standardposition auf –2,9 m unter der Bühne und bildete somit ein an den Zuschauerraum angeschlossenes Volumen (in Übereinstimmung mit Definition in Kapitel 4 der ISO 3382-1) von 400 m³ [3]. Gleiches gilt für das Bühnenhaus. Die Nachhallzeiten wurden für den Orchestergraben als angekoppeltes Raumvolumen einzeln ausgewertet. Jegliche Musikinstrumente wurden vor den Messungen entfernt, nur das Gestühl und die Notenständer verblieben im Orchestergraben.

Die Messpositionen nutzen die Symmetrie des Raumes zur Verringerung des Messaufwands, sie befanden sich an repräsentativen Zuhörerpositionen und sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Höhen von Quelle und Mikrofon über dem Boden wurden in Abhängigkeit des untersuchten Parameters entsprechend den Vorgaben der ISO 3382-1 eingestellt.

Messtechnik

Als Schallquellen kamen die Dodekaeder-Lautsprecher QSAM Typ QS12, Brüel und Kjaer Typ 4292-L und der Brüel und Kjaer Typ 4295 OmniSource (jeweils einzeln) zum Einsatz. Alle verwendeten Schallquellen besitzen eine kugelförmige Abstrahlung, die unter den höchstzulässigen Abweichungen von Tabelle 1 der ISO 3382-1 in liegen [3]. Die Richtcharakteristiken sind in den jeweiligen Herstellerzertifikaten nachgewiesen. Verstärkt wurde das Messsignal mit dem Verstärker PA 1000 oder dem Brüel und Kjaer Typ 2734. Die Aufnahmekette bestand aus dem ungerichteten Mikrofon Earthworks Typ

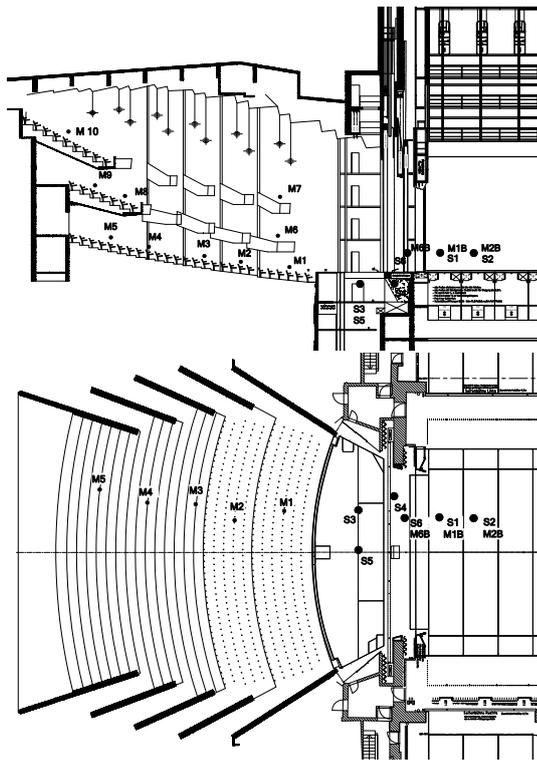


Abbildung 1: Sende- (S) und Messpositionen (M) der hier vorgestellten Messungen in der Deutschen Oper Berlin im Schnitt (oben) und in der Draufsicht (unten).

M30 und dem Interface RME Typ Fireface UCX.

Messmethode

In Übereinstimmung mit der ISO 3382-1 wurde das Verfahren der integrierten Impulsantwort zur Bestimmung der untersuchten raumakustischen Parameter gewählt. Das Anregungssignal zur Bestimmung der Impulsantworten war ein logarithmischer Sweep mit einem Spektrum größer als dem anschließend ausgewerteten Frequenzbereich. Der log. Sweep bietet einen hohen, frequenzunabhängigen Störabstand und entfernt harmonische Verzerrungen der Messtechnik [4]. Das Anregungssignal wurde in jeder Aufnahme dreimalig wiederholt, um den Störabstand durch Mittelung der Messergebnisse zu verbessern. Die Dauer des Anregungssignals lag bei 15 s und damit deutlich über der Nachhallzeit der DOB. Für die hier gezeigten Nachhallzeiten in Terzbändern unterhalb von 160 Hz wurde mit der T20-Methode ausgewertet, da Störabstände in diesem Frequenzbereich von weniger als 45 dB zu beobachten waren [3]. Messungen, in denen der Störabstand geringer als 35 dB war, wurden von der Auswertung ausgeschlossen. Während der Messungen war es nicht möglich, das volle Leistungspotential der Lautsprecher abzurufen. Eine Übersteuerung trat in keiner Stufe der Messkette auf. Das ermittelte Stärkemaß benötigt eine Referenzmessung der abgestrahlten Leistung im Freifeld. Diese wurde im reflexionsarmen Raum der Beuth Hochschule für Technik vorgenommen.

Auswertung der Raumakustik

Nachhallzeit und wahrnehmungsbezogene Größen

Die Nachhallzeit ist in Abbildung 2 für den Orchestergraben bei geschlossenem Sicherheitsvorhang (EG) und für den Zuschauerraum bei geschlossenem (EG) und offenem Sicherheitsvorhang (EO) dargestellt. Die Messergebnisse wurden in diesen Bereichen gemittelt. Die Messungen lassen deutlich erkennen, dass die Streuung mit Abnahme der Frequenz zunimmt. Obwohl die Schröderfrequenz für den Gesamtraum unter 30 Hz liegt, kann aufgrund der heterogenen Verteilung der Oberflächeneigenschaften, unterhalb des mittleren Frequenzbereichs nicht von einem diffusen Schallfeld ausgegangen werden. Im Bereich von 100 Hz erfolgen die logarithmierten Abklingverläufe z. T. wellenförmig oder gekrümmt, was auf unterschiedliche Abklingarten mit verschiedenen Nachhallzeiten hinweist und die Unsicherheit der Messung in diesem Frequenzbereich erhöht. Zur besseren Interpretation der Ergebnisse werden in Abbildung 2 auch der Median und die Verteilung der Messwerte pro Frequenzband angegeben.

Die Nachhallzeiten im 500 Hz Oktavband liegen bei 1,40 s, 1,76 s und 1,53 s für den Orchestergraben (EG), den Zuschauerraum (EO) bzw. den Zuschauerraum (EG). Die Anhebung der Nachhallzeit bei 100 Hz weicht von den Messergebnissen von Cremer et al. ab und ist Gegenstand von weiteren Untersuchungen [1].

Die wahrgenommene Halligkeit wurde mit dem Parameter Frühe Abklingzeit (engl. Early decay time, Abk. EDT) quantifiziert. Nach Berechnung des Parameters in Oktavbändern wurde eine Einzelfrequenz-Mittelwertbildung durch arithmetische Mittelwertbildung über die Oktavbänder mit den Mittenfrequenzen 500 und 1000 Hz vorgenommen. Abbildung 3 basiert auf der Auswertung der EDT unterschiedlicher Quellpositionen am jeweiligen Messpunkt. Es zeigt sich, dass die rückwärtigen Bereiche weniger Abhängigkeit in Bezug auf die Quellposition besitzen. Bezogen auf die Mittelwerte wird eine homogene Wahrnehmung der Nachhallzeit im Zuschauerraum beobachtet.

Die wahrgenommene Transparenz wurde mit den Parametern Klarheit (C80), Deutlichkeit (D50) und Schwerpunktzeit (TS) beurteilt. Für unterschiedliche Positionen der Quelle wurden an den Messpositionen 1 bis 10 Auswertungen der Einzelmittelwerte dieser Parameter vorgenommen. Diese Einzelmittelwerte wurden durch arithmetische Mittelwertbildung über die Oktavbänder 500 und 1000 Hz gewonnen. Abbildung 4 zeigt die Resultate.

Die leichte Begünstigung hinterer Sitzpositionen in Bezug auf C80 und D50 kann auf seitliche, frühe Reflexionen zurückgeführt werden, die im vorderen Publikumsbereich aufgrund des Grundrisses weniger stark ausgeprägt sind.

Bühnenmaße

Wie eingangs beschrieben, erarbeitet das hier vorgestellte Rahmenprojekt SIMOPERA Vorschläge, den Schall-

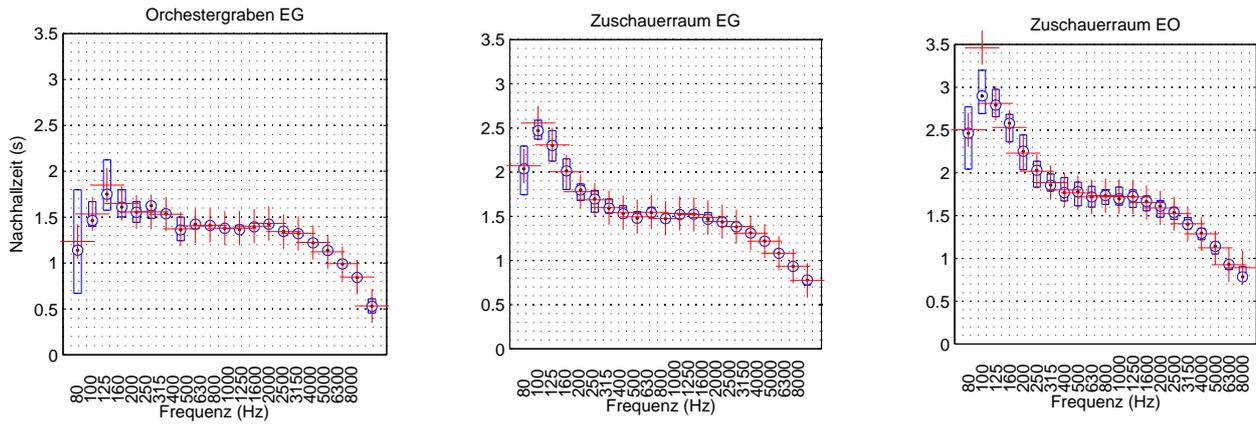


Abbildung 2: Vergleich der Nachhallzeiten im Orchestergraben bei geschlossenem eisernen Vorhang (EG), der Nachhallzeiten im Zuschauererraum bei geschlossenem eisernen Vorhang (EG) und der Nachhallzeiten bei offenem eisernen Vorhang (EO). Der zentrale Kreis ist der Medianwert und das Kreuz der Mittelwert der Nachhallzeiten im jeweiligen Terzband. Die Boxplots geben mit der unteren und oberen Kante das 25 bzw. das 75 Perzentil an.

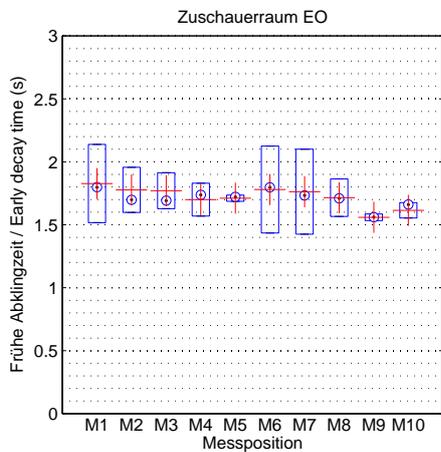


Abbildung 3: Darstellung der frühen Abklingzeit / Early Decay Time (EDT) im Zuschauererraum bei offenem eisernen Vorhang (EO). Der zentrale Kreis ist der Medianwert und das Kreuz der Mittelwert der EDT pro Messposition. Die Boxplots geben mit der unteren und oberen Kante das 25 bzw. das 75 Perzentil an.

druckpegel im Orchestergraben zu senken. Aus diesem Grund wird besonderes Augenmerk auf die aktuelle Situation der Bühnenmaße gelegt. Eine Veränderung der akustischen Gegebenheiten im Orchestergraben darf keinen Nachteil auf die wahrgenommene Lautstärke im Zuschauererraum sowie auf die Balance zwischen Bühne und Orchestergraben nach sich ziehen. Das Stärkemaß G kann beide Situationen abbilden. Aufgrund begrenzter Messzeiten konnten jedoch noch nicht alle Messpositionen erfasst werden.

Die Werte des Stärkemaßes an den beprobten Messpositionen in Abbildung 5 zeigen dennoch bereits den erwarteten Abfall von 1,2 bis 3,3 dB bei Verdopplung des Abstands zur Quelle [5]. Obwohl der Abfall wie erwartet linear erfolgt, sind die Resultate insgesamt und insbesondere für M5 und M8, im hinteren Parkettbereich bzw. auf Rang 1, etwas niedriger als erwartet. Wie eingangs

beschrieben, kann dieses Ergebnis durch die während der Messung teilweise offene Decke begründet sein.

Vergleicht man die Resultate des Stärkemaßes in der DOB mit den Messergebnissen an der Kölner Oper, der Staatsoper unter den Linden, dem Festspielhaus Bayreuth und der Komischen Oper in Vercammen und Lautenbach (2016), so fällt auf, dass das akustische Design in den modernen Häusern (Kölner Oper und DOB) die Balance verbesserte und die Abhängigkeit von der Spielposition verringerte.

Abschließend wird die raumakustische Unterstützung des Zusammenspiels an unterschiedlichen Positionen auf der Bühne und im Orchestergraben in Tabelle 1 mit dem Parameter ST_{early} in [dB] untersucht. Vergleichend werden die Messungen von Vercammen und Lautenbach (2016) an o. g. Opernhäusern gegenübergestellt [6]. Bis auf die Position S4, welche unterhalb der Bühne anhand dieser Messung als eine relativ laute Spielumgebung bestätigt wird, zeigen alle anderen Messpositionen die erwartete raumakustische Unterstützung und die qualitative Vergleichbarkeit mit anderen Opernhäusern.

Tabelle 1: Auswertung des an unterschiedlichen Positionen in der DOB gemessenen Bühnenmaßes ST_{early} in [dB] (EO). Zum Vergleich werden die Werte der Staatsoper unter den Linden (SOL), der Komischen Oper Berlin (KOB), dem Festspielhaus Bayreuth (FB) und der Kölner Oper (KO) an vergleichbaren Messpositionen angegeben [6]. Der übliche Bereich für ST_{early} liegt zwischen -24 und -8 dB.

		DOB	SOL	KOB	FB	KO
Bühne	S6	-14,8	-12,5	-12,3	-14,8	-15,2
	S1	-17,5	-19,5		-17,9	-14,8
	S2	-17,7				
Graben	S3	-9,3		-9,2	-9,5	-11,3
	S5	-10,8				
	S4	-7,3	-9,4	-7,2	-5,3/-4,4	-9,1

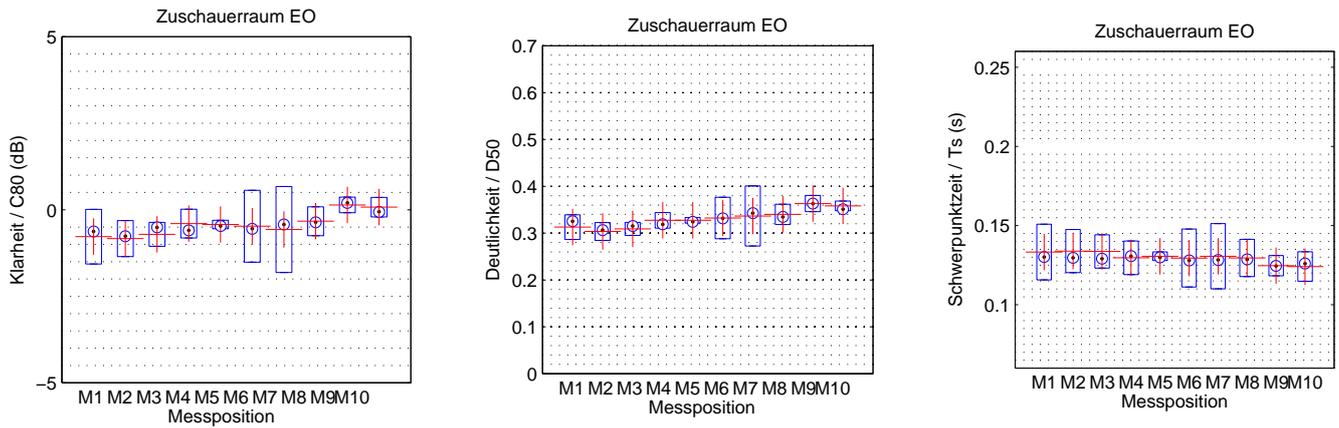


Abbildung 4: Darstellung von Klarheit C80, Deutlichkeit D50 und der Schwerpunktzeit Ts im Zuschauererraum bei offenem eisernen Vorhang (EO). Der zentrale Kreis ist der Medianwert und das Kreuz der Mittelwert des jeweiligen Parameter pro Messposition. Die Boxplots geben mit der unteren und oberen Kante das 25 bzw. das 75 Perzentil an. Zielwerte für C80 liegen im Bereich von -5 bis 5 dB (Just noticeable differences, Abk. JND 1 dB), für D50 von 0,3 bis 0,7 (JND 0,05) und für Ts von 60 bis 260 ms (JND 10 ms).

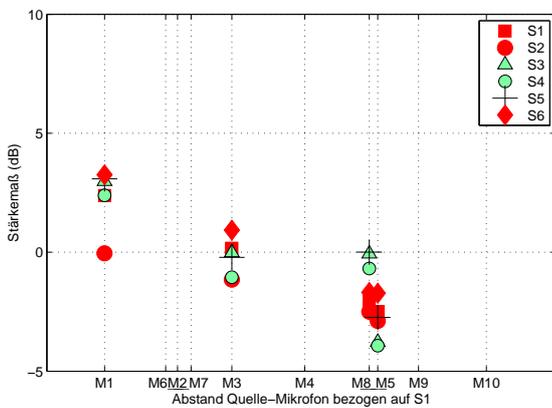


Abbildung 5: Parameter Stärke G als Funktion der Entfernung zur Quellposition S1 und angenähert für alle weiteren Quellpositionen (Auditorium EO). G ist ein Parameter für die wahrgenommene Lautstärke (unabhängig vom Schalldruckpegel der Quelle) und liegt üblicherweise im Bereich von -2 bis 10 dB (JND 1dB).

Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellten raumakustischen Parameter der DOB liegen in den Zielbereichen des Standards ISO 3382-1. Der Vergleich der Bühnenmaße mit anderen Opernhäusern zeigte keine Auffälligkeiten; eine ausgewogene Raum- und Bühnenakustik konnte bestätigt werden. Vorschläge zur Kontrolle modaler Raumeigenschaften (insbesondere im Orchestergraben) sowie zur Verbesserung der akustischen Kommunikation zwischen Bühnendarstellern und dem Orchester sowie innerhalb des Orchesters werden im weiteren Verlauf des SIMOPERA-Projekts auf Grundlage des hier vorgestellten Zustands vorgenommen.

Die messtechnische Untersuchung der DOB wird fortgesetzt. Dazu gehören die Erfassung weiterer raumakustischer Parameter, z. B. des Räumlichkeitseindrucks, und die messtechnische Bestimmung der Absorptions-

werte von Tafelung und Gestühl.

Danksagung und Finanzierungshinweis

Wir bedanken uns bei Herrn Dr. Vercammen für die Möglichkeit der Übernahme der Messergebnisse anderer Musiktheater in Tabelle 1. Diese Arbeit wird durch das Berliner Institut für angewandte Forschung (IFAF) und die WAX GmbH gefördert.

Literatur

- [1] Cremer, L., Nutsch, J. and Zemke, H.J. (1962) Die akustischen Maßnahmen beim Wiederaufbau der Deutschen Oper Berlin. *Acustica* 12, 428-433
- [2] Kimmich, J.M., Frank, S., Schlesinger, A., Ochmann, M. und Tschakner, M. (2018) Berechnung des Schallfeldes in der Deutschen Oper Berlin mit Raytracing und der Finiten Elemente Methode. Tagungsband der DAGA 2018, München
- [3] DIN EN ISO 3382-1:2009-10. Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 1: Aufführungsräume (ISO 3382-1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 3382-1:2009. Berlin: Beuth-Verlag, Oktober 2009
- [4] Hulsebos, E. (2004) Auralization using Wave Field Synthesis. Dissertation, TU Delft
- [5] Kuttruff, H. (2009) Room Acoustics, Fifth Edition, Spon Press, London and New York
- [6] Vercammen, M. und Lautenbach, M. (2016) Stage and pit acoustics in opera houses. Proceedings of the ISMRA, Buenos Aires