Der Konzertsaal bebt - Vibroakustische Messungen in der Dresdner Semperoper

Sebastian Merchel, M. Ercan Altinsoy

TU Dresden, Lehrstuhl für Kommunikationsakustik, sebastian.merchel@tu-dresden.de

Einleitung

Schall wird oft sowohl auditiv als auch taktil wahrgenommen. So hört und spürt man die Schwingungen in Kraftfahrzeug oder Bahn. Bei einem Rockkonzert wird der menschliche Körper oft zum Mitschwingen angeregt, aber auch im Konzertsaal können Boden oder Sitzflächen vibrieren.

Dieser Beitrag diskutiert das Verhältnis von Schall und Vibrationen in der Semperoper Dresden für Frequenzen bis 1 kHz. Dazu wurden die Transferfunktionen zwischen Schalldruck und Beschleunigung an verschiedenen Sitzplätzen gemessen.

Messaufbau

Als Schallquelle diente ein Dodekaeder mit Subwoofer (Outline, Globe Source) auf dem angehobenen Orchestergraben (siehe Abbildung 1). Der Lautsprecher wurde 4 m von der Bühnenkante entfernt und 1,5 m seitlich der Mittelachse positioniert. Um zu prüfen, welchen Anteil in den Boden eingeleitete Vibrationen an der Erzeugung von Schall und Schwingungen im Zuschauerraum haben, konnte der Subwoofer mittels einer Schaumstoffmatte (55 cm x 45 cm x 16 cm) vibratorisch vom Bühnenboden entkoppelt werden. Die vertikale Resonanzfrequenz des so gelagerten Lautsprechers lag bei 8 Hz.

Abbildung 1: Zuschauerraum der Semperoper Dresden mit Schallquelle auf dem angehobenen Orchestergraben.

Die Messung konnte nur nachts im leeren Konzertsaal durchgeführt werden. Im Vergleich zum zwei Drittel besetzten Zuschauerraum wird die Nachheilzeit dadurch unter 2 kHz nur 0,5 s verlängert und der gemittelte Schalldruckpegel über die Messplätze R1 bis R6 (siehe Abbildung 2) etwa 3 dB verstärkt [1]. Für klassische Konzerte wird der Bühnenraum üblicherweise mittels eines Konzertzimmers verkleinert. Da dieses nicht zur Verfügung stand, wurde die Messung bei geschlossenem eisernen Vorhang durchgeführt. Die Nachhallzeit verändert sich dadurch ebenfalls nur geringfügig [1].

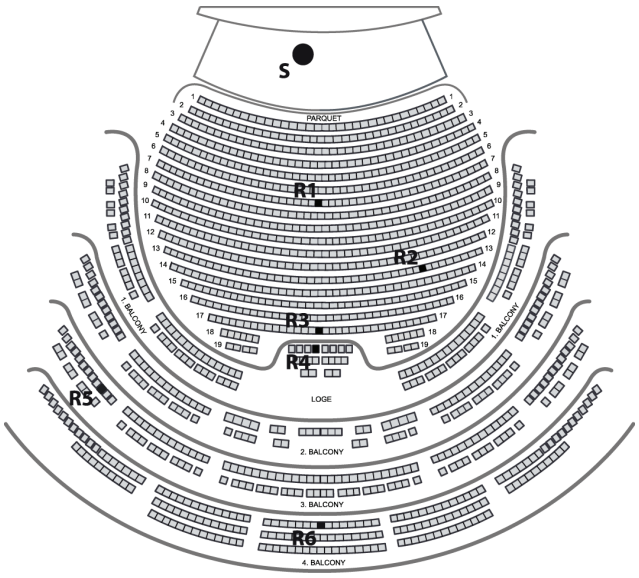

Abbildung 2: Sitzplan der Semperoper Dresden mit Messposition R1 bis R6 und Position S der Schallquelle.

Als Empfangspositionen wurden drei Plätze im Parkett (R1 – R3), ein Logensitz (R4) und zwei Sitze in den Rängen (R5 und R6) ausgewählt. Für die Messung der Raumimpulsantworten kamen ein Messmikrofon (B&K, 4188) ein Mikrofonarray (DPA 4011-TL) sowie ein Kunstkopf (Kemar, geblockte Ohrkanäle) zum Einsatz. Beschleunigungsaufnehmer (Kistler, 8636C10) an Fußboden, Sitzflächen und Armlehnen erfassten die Vibrationen. Die Messplätze wurden während der Messung durch eine Person (80 kg) belastet.

Ergebnisse

Abbildung 3 zeigt die Transferfunktionen zwischen Beschleunigung am Boden und Schalldruckpegel am selben Messplatz in Ohrhöhe bei Anregung mit weißem Rauschen. Dies entspricht der Differenz aus Beschleunigungspegel und Schalldruckpegel L_{acc} - L_{SPL}. Grob genähert gruppieren sich die Kurven um 0 dB. Dies entspricht etwa gleichen Pegeln für Schall und Bodenschwingungen. Es ist erkennbar, dass für Frequenzen kleiner 200 Hz im Parkett (R1 – R3) höhere Beschleunigungspegel gemessen werden. Interessanterweise ist dieser ortsabhängige Unterschied an der Sitzoberfläche (Abbildung 4) nicht mehr feststellbar. Der Frequenzverlauf ist breitbandig relativ homogen mit leichtem Abfall zu tieferen Frequenzen. Nur auf wenigen Plätzen können isolierte Resonanzüberhöhungen beobachtet werden (z.B. 100 Hz an Position R4). Vergleicht man die Frequenzverläufe in Abbildung 5 mit und ohne

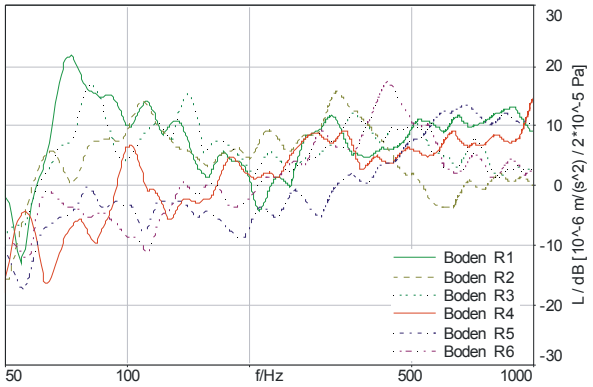

Abbildung 3: Transferfunktion zwischen Beschleunigung am *Boden* und Schalldruckpegel für alle Messpositionen.

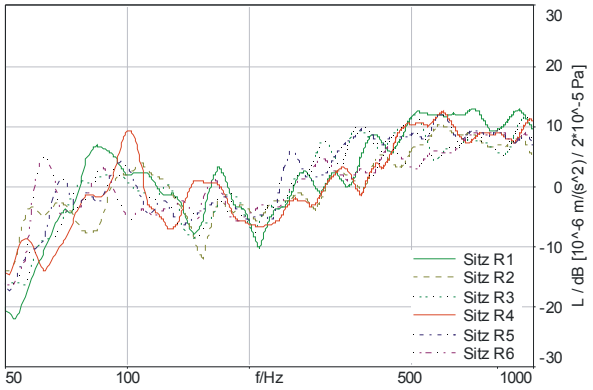

Abbildung 4: Transferfunktion zwischen Beschleunigung am *Sitz* und Schalldruckpegel für alle Messpositionen.

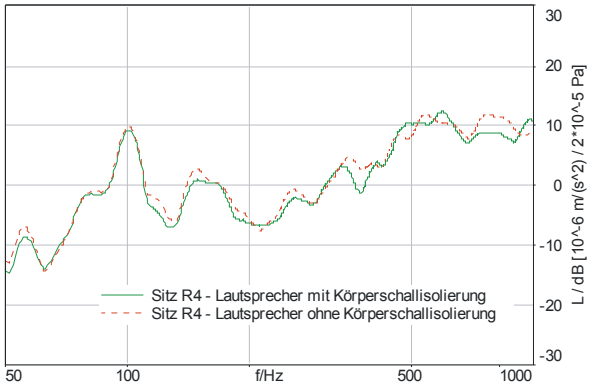

Abbildung 5: Transferfunktion zwischen Beschleunigung am *Sitz* und Schalldruckpegel – Messplatz R4.

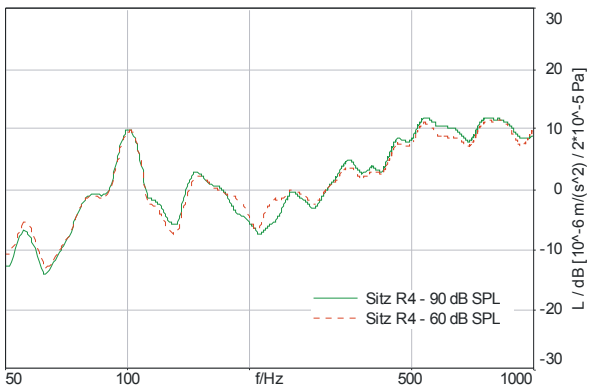

Abbildung 6: Transferfunktion zwischen Beschleunigung am *Sitz* und Schalldruckpegel – Messplatz R4.

Körperschallisolierung des Lautsprechers, so kann kein wesentlicher Unterschied festgestellt werden. Dies lässt vermuten, dass die Vibrationen im Zuschauerraum durch Luftschall angeregt werden. Dieses Ergebnis konnte für alle Messpositionen bestätigt werden. Auch für veränderlichen Schalldruckpegel am Empfangsort bleibt die Transferfunktion nahezu unverändert (Abbildung 6).

Diskussion

Typische Schalldruckpegel im Konzertsaal für voll orchestrierte Passagen liegen je nach Besetzung und Raum zwischen 80 und 90 dB (forte) [2]. Im *fortissimo* kann der mittlere Schalldruckpegel um weitere 10 dB steigen [3]. In der Semperoper wurden beispielsweise für ein Motiv aus Wagners Lohengrin Schallpegel L_{AI} von 96 bis 98 dB gemessen [1]. Der Spitzenpegel bei tiefen Frequenzen kann jedoch noch höhere Werte erreichen. Unter Berücksichtigung der Fühlschwelle für Sitzschwingungen ($L_{acc} \approx 90$ dB für Frequenzen kleiner 200 Hz, danach ansteigend [4]) ergeben sich aus den vorgestellten Messungen schwellnahe, aber spürbare Vibrationen im Konzert. Diese Vibrationen nimmt man jedoch meist nicht bewusst wahr, da sie schwach ausgeprägt sind und mit den anderen Sinnesmodalitäten zu einem multimodalen Konzertereignis integriert werden. Dass Vibrationen wichtig sind, konnte bereits in Laborstudien gezeigt werden. Moderate Sitzvibrationen beeinflussten die wahrgenommene Qualität von klassischer Konzertwiedergabe positiv [5,6]. Auch im Konzertsaal könnten stärkere Vibrationen das Konzerterlebnis verbessern.

Literatur

[1] W. Kraak: Bericht zur akustischen Erprobung der Semperoper Dresden, TU Dresden, 1984

[2] Meyer, J.: Akustik und musikalische Aufführungspraxis, Verlag Erwin Bochinsky, 5. Auflage, Frankfurt am Main 2004

[3] Weinzierl, S. (Hrsg.): Handbuch der Audiotechnik. Springer Verlag, Berlin 2008

[4] Merchel, S., Altinsoy, M.E. & Stamm, M.: Equal Intensity Contours for Whole-Body Vibrations Compared with Vibrations Cross-Modally Matched to Isophones HAID, LNCS 6851, Springer, Berlin 2011

[5] Merchel, S. & Altinsoy, M.E.: 5.1 oder 5.2 Surround - Ist Surround taktil erweiterbar?, DAGA, Dresden 2008

[6] Merchel, S. & Altinsoy, M.E.: Vibratory and Acoustical Factors in Multimodal Reproduction of Concert DVDs, HAID, LNCS 5763, Springer, Berlin 2009