Vergleich verschiedener Schallmessmethoden bei Bauteiluntersuchungen im tieffrequenten Bereich

Polina Pirch, Bernd Nusser

Holzforschung Austria, 1030 Wien, E-Mail: p.pirch@holzforschung.at

Einleitung

Die messtechnische Erfassung tieffrequenter Schallfelder im Rahmen von bauakustischen Messungen stellt eine große Herausforderung dar. Der Grund dafür ist, dass das Schallfeld bei tiefen Frequenzen durch eine geringe Modenanzahl bestimmt wird. Ziel der gegenständlichen Untersuchungen ist es, ein Messverfahren mit guter Wiederholbarkeit und möglichst geringem Zeitaufwand zu finden. Es werden dazu unterschiedliche Methoden zur Abtastung der Schallfelder in Prüfräumen verglichen und Vorschläge zur Optimierung erarbeitet.

Laboraufbau

Prüfstand

Der verwendete Bauteil-Prüfstand wurde nach ISO 10140-5 konzipiert und ist im Zuge des Forschungsprojekts „Akustik Center Austria“ entstanden [1]. Das Volumen des Empfangsraums (ER) beträgt 55,3 m^3, jenes des Senderaums (SR) 62,2 m^3. Der Prüfrahmen mit eingebauter Prüfwand wird zwischen dem SR und ER eingespannt. Die Abmessungen des geprüften Bauteils entsprechen der Prüföffnung (10 m^2). Dadurch ist keine Nische vorhanden die eine zusätzliche Quelle von systematischen Abweichungen darstellt.

Prüfbauteil

Die Untersuchungen wurden an einer doppelschaligen Ständerwand mit Metallständer und doppelter Gipskartonbeplankung durchgeführt. Der Wandaufbau und die Einbaubedingungen wurden entsprechend dem CEN-Ringversuch [2] gewählt. Die Wand weist nach eigenen Messungen ein bewertetes Schalldämm-Maß von R_w (C; C_{tr}) = 67 (-9; -10) dB auf.

Methode

Motiviert durch die Untersuchungen von Schoenwald, Zemp und Pedersoli [3] wurden folgende Verfahren zum Methodenvergleich herangezogen:

- Raumabtastung in einem dichten Raster
- „Standardverfahren“ nach ISO 10140
- „Eckverfahren“ nach ISO 16283-1
- Diagonalverfahren [4]
- Intensitätsverfahren nach ISO 15186-3.

Bei allen Methoden, außer beim Intensitätsverfahren, wurden dieselben Lautsprecherpositionen entsprechend ISO 10140-5 ausgewählt. Die in Abb. 1 dargestellten Lautsprecher wurden gleichzeitig betrieben. Als Signal wurde weißes Rauschen verwendet. Die Messung für jede Mikrofonposition dauerte 20 Sekunden, außer bei der Abtastung für das Intensitätsverfahren (bis zu 300 Sekunden). Eine Korrektur aufgrund von Hintergrundgeräuschen war bei keiner Messung erforderlich. Die Nachhallzeit wurde aus Sinus-Sweep Messungen mittels Rückwärtsintegration bestimmt. Dabei wurden 3 Lautsprecherpositionen mit je 4 Mikrofonpositionen nach ISO 3382-2 angeordnet.

Abbildung 1: Lautsprecherpositionen im Senderaum.

Zur Berechnung des Schalldämm-Maßes R nach Gleichung 1 wurde je nach Verfahren der entsprechende energetische Pegelmittelwert L_{SR} bzw. L_{ER} aus den mehrfach durchgeführten Einzelmessungen verwendet (außer beim Intensitätsverfahren). Die Wandfläche S in m^2, die Nachhallzeit T in s und das Volumen des Empfangsraums V in m^3 bleiben hingegen bei jedem Verfahren konstant.

$$R = L_{SR} - L_{ER} + 10\log\left(\frac{S \cdot T}{0{,}16 \cdot V}\right) \quad \text{[dB]} \qquad (1)$$

Die Standardabweichung des Schalldämm-Maßes s_R wurde durch eine vereinfachte Fehlerrechnung nach Gleichung 2 bestimmt. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Abweichungen hierbei addieren. Die dafür notwendige Standardabweichung der Nachhallzeiten s_{T30} wurde aus 15 Einzelmessungen ermittelt und beträgt maximal 0,3 dB. Die Standardabweichungen der einzelnen Mittelwerte $s_{L,SR}$, $s_{L,SR}$ und s_{T30} wurden arithmetisch ermittelt.

$$s_R = s_{L,SR} + s_{L,SR} + s_{T30} \quad \text{[dB]} \qquad (2)$$

Raumabtastung für Referenzwertbildung

Eine hochaufgelöste Raumabtastung wurde mithilfe einer automatisierten Messvorrichtung durchgeführt. Das Mikrofon folgte dabei schrittweise einem vordefinierten Messpfad in 6 horizontalen Ebenen. Auf diese Weise wurden im Empfangsraum 480 und im Senderaum 282 Messpunkte gemessen. Der Teil des Senderaums in dem sich die Lautsprecher befanden, wie in Abb. 2 zu sehen ist, wurde von der Abtastung ausgeschlossen. Die Messpositionen der anderen Verfahren befanden sich ebenso außerhalb dieses Bereichs. Der minimale Abstand zu den Lautsprechern

betrug 0,8 m und zu den Raumbegrenzungen 0,2 m bis 0,3 m. Die Auswahl des Rasters hat keinen Einfluss auf die relative Differenz zwischen den Messverfahren [5].

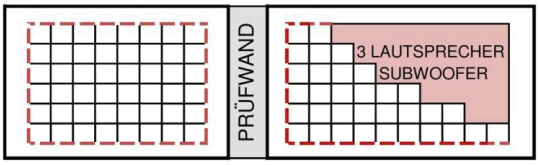

Abbildung 2: Horizontaler Schnitt des Messrasters im ER (links) und SR (rechts). Lautsprecherbereich (rot) wurde ausgeschlossen.

Standardverfahren

Die Messungen zum „Standardverfahren“ wurden entsprechend der Normreihe ISO 10140 durchgeführt. Die Mindestabstände zwischen Mikrofonpositionen und Raumbegrenzungen betrugen 0,7 m und zu den Lautsprechern und dem Prüfkörper 1 m. Insgesamt wurden 10 Datensätze erhoben.

Eckverfahren

Gemäß ISO 16283-1 ist für in-situ Messungen in Räumen mit einem Volumen unter 25 m^3 das „Eckverfahren“ zur Messung des tiefen Frequenzbereichs heranzuziehen. Dabei werden ausschließlich 50 Hz, 63 Hz und 80 Hz Terzbänder betrachtet. Zusätzlich zum Standardverfahren wird der Schalldruckpegel in jeder Raumecke L_{eck} gemessen. Die Ermittlung des Raum-Mittelwertes L_{LF} erfolgt je Terzband nach Gleichung 3, wobei der maximale Pegelwert L_{eck} im Verhältnis 1:2 mit dem „traditionell“ ermittelten Schallpegel des Diffusfeldes L_{diff} gewichtet wird.

$$L_{LF} = 10\log\left[\frac{1}{3}\left(10^{0,1\cdot L_{Eck}} + 2\cdot 10^{0,1\cdot L_{diff}}\right)\right] \quad \text{[dB]} \qquad (3)$$

Bei den Untersuchungen wurden in jedem Raum für alle 8 Ecken je 5 Datensätze ermittelt. Die Abstände zu den Raumbegrenzungen in den Eckpositionen wurden zwischen 0,3 m - 0,4 m variiert.

Diagonalverfahren

Das Diagonalverfahren ist eine nicht standardisierte Messmethode für rechteckige Räume mit modalem Schallfeld. Bei diesem Verfahren wird davon ausgegangen, dass das Schalldruckpegel-Minimum und -Maximum entlang einer Diagonale gleichermaßen zum Mittelwert beitragen [4]. Schoenwald et al. schlagen vor, lediglich die Halbdiagonalen von der Raumecke bis zur Raummitte anstatt der vollen Diagonalen zu untersuchen, sowie die Anzahl der Mikrofonpositionen zu erhöhen [3]. Es wurden deshalb je 10 Mikrofonpositionen mit einem Abstand von ca. 0,3 m entlang einer halben Raumdiagonale gemessen. Der Mindestabstand zu den Raumbegrenzungen betrug ca. 0,2 m. Im ER wurden insgesamt 8 Halbdiagonalen abgetastet. Im SR aufgrund der Lautsprecherpositionen und dem dazu notwendigem Mindestabstand wurden zwei Halbdiagonale, wie in Abb. 3 dargestellt, erfasst.

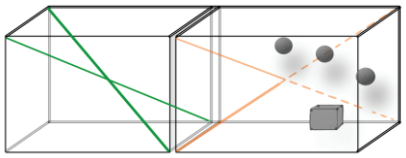

Abbildung 3: Abtastschema beim Diagonalverfahren im ER (links, grün) und SR (rechts, orange).

Intensitätsverfahren

Die Messungen und die Auswertung wurden nach ISO 15186-3 bei 50 Hz, 63 Hz und 80 Hz Terzbändern durchgeführt. Die Rückwand im Empfangsraum wurde nach Normvorgaben absorbierend verkleidet. Im Senderaum wurden 5 Lautsprecherpositionen auf einer Linie und 16 Mikrofonpositionen an der Wandoberfläche inklusive Randbereiche verteilt. Die kontinuierliche Abtastung der gesamten Oberfläche der Prüfwand erfolgte mit einer Intensitätssonde mit einem Abstandshalter von 10 cm.

Differenzbildung zwischen den Messverfahren

Die Genauigkeit der Messverfahren lässt sich durch eine Differenzbildung mit dem Referenzwert vergleichen. Der Referenzwert L_{ref} bzw. R_{ref} (gebildet mit allen Messpunkten im Raster, d.h. inkl. Randbereiche) wird von dem Mittelwert der jeweiligen Methode $L_{methode}$ bzw. $R_{methode}$ abgezogen (vgl. Abb. 8 und Abb. 9).

Ergebnisse

Schallpegelverteilung im Raum

Die Raumabtastung in einem dichten Raster diente als Referenz und zur Analyse der Schallfelder in den Prüfräumen. Abb. 4 zeigt den spektralen Verlauf der Standardabweichung s_L des mittleren Schalldruckpegels. Wie zu erkennen ist, liegt die Standardabweichung in den betrachteten Terzbändern für beide Prüfräume zwischen 2 dB und 5 dB.

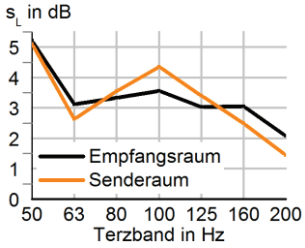

Abbildung 4: Standardabweichung s_L des mittleren Schalldruckpegels im ER und SR aus der Rastermessung.

Die Abb. 5-7 visualisieren die Modenformen bei den einzelnen Terzbändern in den beiden Prüfräumen bzw. zeigen die Häufigkeitsverteilung (Histogramme) der ermittelten Schalldruckpegel. Aus Abb. 5 ist ersichtlich, dass das Schallfeld beim 50 Hz Terzband aufgrund einer stehenden Welle im Empfangsraum eine bimodale Verteilung im Histogramm aufweist. Die beiden Modi dieser Verteilung sind weit voneinander entfernt, wodurch eine hohe Standardabweichung von bis zu 5 dB entsteht. Aufgrund des Wegfallens eines großen Messbereichs durch den einzuhaltenden Mindestabstand zum Lautsprecher ist dieser Effekt im Senderaum nicht zu erkennen.

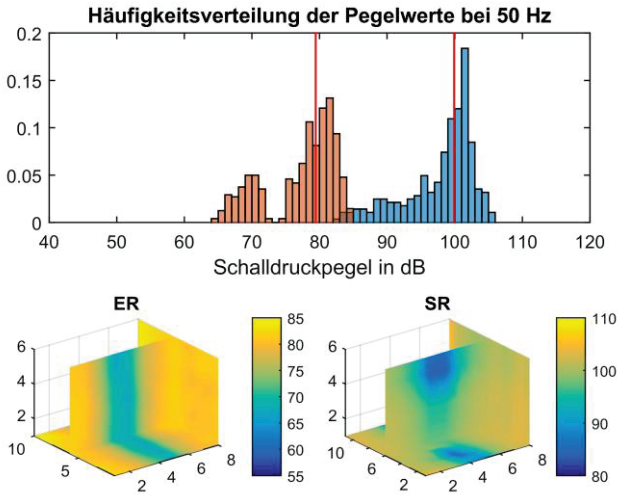

Abbildung 5: Oben: Häufigkeitsdichte der Pegelverteilung im ER (links) und SR (rechts) sowie der Raum-Mittelwert (rot) bei 50 Hz. Unten: das Schallfeld im ER und SR.

Abb. 6 zeigt eine breite Normalverteilung der Häufigkeitsdichte bei 100 Hz. Die Standardabweichung bei diesem Terzband beträgt max. 4,4 dB und ist durch die Geometrie des Senderaums bestimmt.

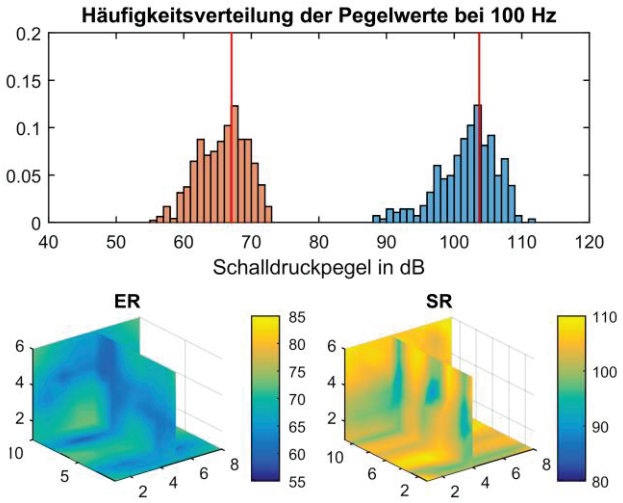

Abbildung 6: Oben: Häufigkeitsdichte der Pegelverteilung im ER (links) und SR (rechts) sowie der Raum-Mittelwert (rot) bei 100 Hz. Unten: das Schallfeld im ER und im SR.

Abb. 7 zeigt eine schmale Häufigkeitsverteilung der gemessenen Schalldruckpegel bei 200 Hz und somit eine geringe Standardabweichung von 1,5 dB bis 2,0 dB in beiden Prüfräumen.

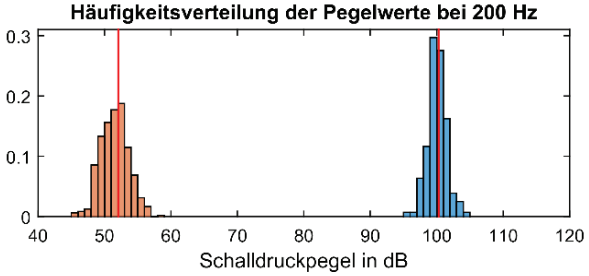

Abbildung 7: Häufigkeitsdichte der Pegelverteilung im ER (links) und SR (rechts) sowie der Raum-Mittelwert (rot) bei 200 Hz.

Standardverfahren

Die zusammengefassten Ergebnisse der Schallpegelmessungen im Empfangs- und Senderaum bzw. die daraus resultierenden Schalldämm-Maße sind in Abb. 8 und Abb. 9 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die mittleren Schalldruckpegel im ER und SR bis inkl. 80 Hz aufgrund der Mindestabstände nach ISO 10140-4 im Vergleich zu der Referenzmessung stark unterschätzt werden. Eine Ausnahme bildet das 100 Hz Terzband. Abb. 6 unten rechts zeigt, dass die Pegel-Maxima bei diesem Terzband eher im zentralen Bereich des Senderaums verteilt sind, und die Pegel-Minima eher in Randbereichen auftreten.

Da die Differenz zum Referenzpegel im Senderaum größer ist als im Empfangsraum, weist das Schalldämm-Maß nach Standardverfahren eine positive Abweichung auf (siehe Abb. 9), d.h. die Schalldämmung des Bauteils wird überschätzt. Die Ursachen der Unterschiede zwischen SR und ER müssen noch genauer untersucht werden. Der Verlauf der Standardabweichung beim Standardverfahren in Abb. 9 ähnelt jener der Schallpegelverteilung aus der Abb. 4.

Eckverfahren

Das Eckverfahren liefert systematisch höhere mittlere Schalldruckpegelwerte (Abb. 8, rot) als alle anderen Verfahren. Diese Erkenntnis stimmt mit den Ergebnissen in [3], [5], [7] überein. Wie beim Standardverfahren, ist die Abweichung zur Referenz im Senderaum größer als im Empfangsraum. Daher ist das Schalldämm-Maß ebenso höher als bei der Referenzmessung. Auch die Standardabweichung des Verfahrens in Abb. 9 wird durch die Gewichtung 1:2 deutlich von L_{diff} beeinflusst, obwohl die Abweichung zwischen den maximalen Pegelwerten in den Ecken nur noch 0,2 dB beträgt.

Die Ecke mit maximalen Pegelwerten im Senderaum befand sich im ausgeschlossenen Bereich auf der Lautsprecherseite. Daher wurde diese bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Wird sie bei der Berechnung doch herangezogen, ist die Differenz um ca. 1 dB höher.

Diagonalverfahren

Wie in [3] zeigt das Diagonalverfahren eine niedrige Standardabweichung und eine gute Übereinstimmung mit den Referenzwerten (Abb. 8 und Abb. 9, grün). Für den ER sind die Vergleichskriterien Genauigkeit und Wiederholbarkeit am besten erfüllt, wenn die Diagonalen (bzw. Halbdiagonalen) den Verlauf von oben nach unten in Richtung Prüfwand folgen. Diese sind in Abb. 3 grün eingezeichnet. Der Nachteil des Verfahrens ist, dass im SR aufgrund des Lautsprecherbereichs ein Pegelmittelwert lediglich zwischen den beiden Diagonalen (Abb. 3, orange) zur Analyse herangezogen werden kann und keine Standardabweichung ermittelt werden kann.

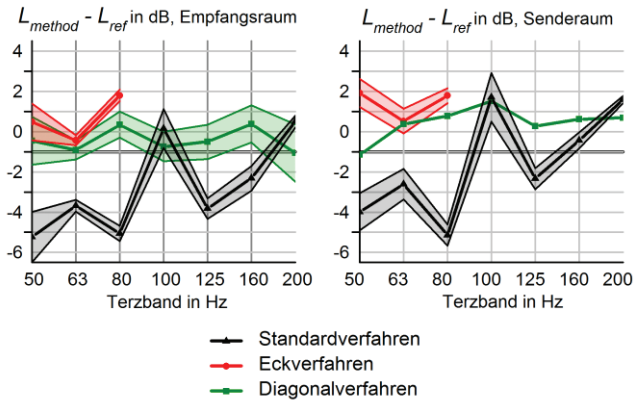

Abbildung 8: Differenzen $L_{method} - L_{ref}$. Die Mittelwerte und die Standardabweichungen sind aus häufig angewendeten Messverfahren ermittelt. Links: ER, rechts: SR.

Intensitätsverfahren

Die Ergebnisse des Verfahrens für tiefe Frequenzen nach ISO 15186-3 zeigen in Abb. 9 eine gute Übereinstimmung mit der Referenzmessung und eine sehr gute Wiederholbarkeit. Dies resultiert aus der Tatsache, dass die Standardabweichung der mittleren Schalldruckpegel an der Oberfläche der Prüfwand kleiner ist als die der mittleren Schalldruckpegel im Raum [8]. Laut Dijckmans und Vermeir haben die Lautsprecherpositionen bei diesen Verfahren einen geringen Einfluss auf die Messergebnisse.

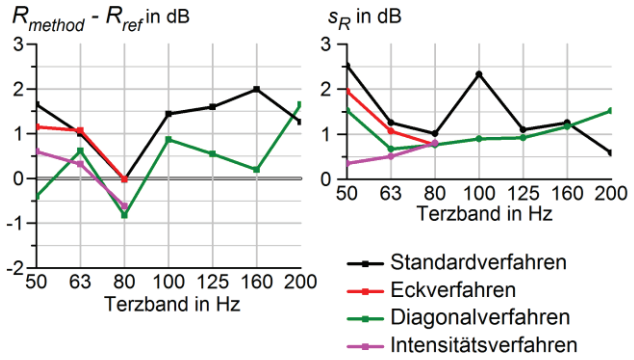

Abbildung 9: Differenzen $R_{method} - R_{ref}$ (links) und Standardabweichungen s_R (rechts).

Zusammenfassung

Die Vorgehensweise mit zufällig gewählten Positionen für die Bestimmung des Schalldämm-Maßes beim Standard- und Eckverfahren im erweiterten Frequenzbereich ab 50 Hz führt zu einer erhöhten Standardabweichung bei beiden Messmethoden. Es wird eine strukturierte Anordnung der Messpositionen entlang definierter Raumdiagonalen vorgeschlagen, da diese Messmethode wenig Zeitaufwand benötigt und Messergebnisse mit einer relativ geringen Standardabweichung liefert. Für eine gute Übereinstimmung mit der Referenzmessung wird eine Halbdiagonale im Empfangsraum und zwei Halbdiagonalen mit je 10 Mikrofonpositionen im Senderaum benötigt.

Ausblick

Pedersen, Møller und Waye schlagen den Raum-Perzentilpegel L_{10} anstatt des hier verwendeten Raum-Mittelwertes als Referenzwert vor [6]. Die Frage der Anwendbarkeit von L_{10} im Prüfstand ist noch zu klären.

Es wurde beobachtet, dass die Abweichungen zum Referenz-Schalldämm-Maß hauptsächlich durch die höheren Differenzen im Senderaum hervorgerufen werden. Die Ursachen für die erhöhten Differenzen im Senderaum sind noch tiefergehend zu untersuchen.

Literatur

[1] Dolezal, F., Neusser, M., Teibinger, M., Nusser, B.: *Akustik Center Austria - new research and testing competence for timber constructions*, WCTE 2016 in Wien

[2] Demanet, C., De Rozas, M. J., Chéné, J.-B., Foret, R.: *European Round Robin Test for sound insulation measurements of lightweight partition*, InterNoise 2011 in Osaka

[3] Schoenwald, S., Zemp, A., Pedersoli, S.: *Applicability of measurement method according to ISO 16283 in small rooms at low frequencies*, InterNoise 2016 in Hamburg

[4] Moorhouse, A., Ramadorai, R.: *Measurement of the Average Sound Pressure Level in a Room at Low Frequency*, ICSV 13 in Wien, 2006

[5] Simmons, C.: *Uncertainties of room average sound pressure levels measured in the field according to the draft standard ISO 16283-1. Experiences from a few case studies*, AkuLite Report 3, SP Technical Research Institute of Sweden, 2012

[6] Pedersen, S., Møller, H., Waye, K. P.: *Indoor Measurement of Noise at Low Frequencies – Problems and Solutions*, Journal of low frequency noise, vibration and active control, 26 (4), 249-270, 2007

[7] Hopkins, C., Turner, P.: *Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies*, Applied Acoustics, 66, 2005

[8] Dijckmans A., Vermeir, G.: *Numerical investigation of the repeatability and reproducibility of laboratory sound insulation measurements*, Acta Acustica United with Acustica, 99 (3), 421-432, 2013.