

Raumakustik im Senderraum bei Prüfung des Schalldämm-Maßes

Florian Dirnberger¹, Polina Pirch², Thomas Bednar, Maximilian Neusser

¹ TU Wien, Forschungsbereich Bauphysik, 1040 Wien, E-Mail: florian.dirnberger@gmail.com

² TU Wien, Forschungsbereich Bauphysik, 1040 Wien, E-Mail: polina.pirch@trikustik.at

Einleitung

Reproduzierbarkeit von bauakustischen Messergebnissen zwischen Laboren im tiefen Frequenzbereich wurde in mehreren Ringversuchen und Studien als Problem bezeichnet (Lechner, Demanet, Hongisto [1-3]). Die unterschiedlich ausgeprägten Raummoden sind eine von mehreren Ursachen für Abweichungen. Nach der aktuellen Normenserie EN ISO 10140 zur Messung des Schalldämm-Maßes (R) im Prüfstand wird die Raumakustik im Senderraum (SR) nicht berücksichtigt. Sehr wohl geht die Nachhallzeit bzw. die äquivalente Absorptionsfläche im Empfangsraum (A_{ER}) in die Berechnung von R ein. Der normativ vorgegebene Bereich der Nachhallzeit (RT) in beiden Räumen von 100 Hz aufwärts liegt zwischen 1 und 2 s. Wird eine Abhängigkeit der Schalldämm-Maßes von der Nachhallzeit im SR festgestellt, darf bei größeren Prüfvolumina die obere Grenze der Nachhallzeit nach oben hin verschoben werden.

In der vorliegenden Untersuchung wurde anhand einer doppelschaligen Trennwand die Schallübertragung bei Variation der lokal eingebrachten Absorption im Senderraum gemessen, während der Empfangsraum gleich blieb. Ziel der Untersuchung war es, die Abhängigkeit des Schalldämm-Maßes von der Nachhallzeit im SR zu quantifizieren.

Um ein vertieftes Verständnis zur Abhängigkeit des Schalldämm-Maßes vom Schallfeld zu bekommen, wurden neben den normativen Messungen auch Rastermessungen der Schallfelder in den Prüfräumen durchgeführt.

Hintergrund der Untersuchungen

Die theoretische Formulierung der Schallübertragung zwischen zwei Räumen in Gleichung 1 dient seit 1920 als Grundlage für das standardisierte Messverfahren der Luftschalldämmung nach EN ISO 10140-2:

$$R = L_{eq,SR} - L_{eq,ER} + 10 \log\left(\frac{S}{A_{ER}}\right) \quad \text{in dB} \quad (1)$$

wobei R das Schalldämm-Maß, L_{eq} den äquivalenten Schalldruckpegel im SR bzw. ER, S die raumtrennende Bauteilfläche und A_{ER} die äquivalente Absorberfläche des Empfangsraums darstellt. Der Zusammenhang von A_{ER} mit der Nachhallzeit RT und dem Volumen des Raumes in Form der Sabine'schen Formel ist hinreichend bekannt und wird hier nicht angeführt.

Eine der Annahmen dieser Formulierung ist, dass sich in den Räumen ein diffuses Schallfeld einstellt. In realen Räumen bilden sich jedoch Raummoden und verfälschen somit die Messungen [4]. Auch im Anhang A der einschlägigen Norm EN ISO 10140-4 ist festgehalten, dass in üblichen Prüfräumen mit Volumen von etwa 50 m³ kein diffuses Schallfeld in den Frequenzen unter 400 Hz und besonders unter 100 Hz zu erwarten ist.

Maluski und Gibbs [5] stellten fest, dass der Grad der Modenkopplung zwischen den Räumen Unterschiede in der Schalldämmung verursachen kann. In einem neueren Beitrag hat Roozen gezeigt, dass das modale Verhalten des Empfangsraums die von der schwingenden Wand abgestrahlte Schalleistung beeinflussen kann. Im Vergleich zur Freifeldabstrahlung kann die Schalleistung der Wand bei den Resonanzfrequenzen des Empfangsraumes um mehr als 10 dB steigen, während sie bei den nicht-resonanten Frequenzen geringer wird [6].

Methode

Prüfstand / Prüfbaueteil

Die Untersuchungen wurden im Akustik Center Austria im XL-Prüfstand durchgeführt. Hierbei handelt es sich um einen Prüfstand mit überdurchschnittlich großen Prüfräumen (etwa 150 m³). Je eine Raumabmessung liegt im Bereich der Wellenlänge bei 50 Hz. Der SR hat Abmessungen von L / B / H = 6,7 / 5,3 / 3,9 m; der ER ist etwas größer L / B / H = 7,4 / 5,3 / 3,9 m. Der Prüfstand wird meist für die Prüfungen von Bauteilen in Leichtbauweise verwendet. Die äußere Schale des Senderraums ist aus Massivholz und jene des Empfangsraums aus Beton gefertigt. Das bewertete Grenzschalldämm-Maß des Wandprüfstands beträgt 84,0 dB.

Das untersuchte Bauteil ist eine hochschalldämmende zweischalige Trockenbauwand mit einem bewerteten Schalldämm-Maß von 79,0 dB. Es handelt sich um einen symmetrischen Aufbau mit 50/180 mm Holzriegel und dreifacher Beplankung mit Gipsfaserplatten (2x 18 mm, 1x 12,5 mm). Der Hohlraum ist vollständig mit Glaswolle ausgedämmt und die beiden Schalen sind durch 20 mm Klemmfalz separiert. Weitere Konstruktionsdetails findet man in der Arbeit von Dirnberger [7].

Variation der Raumakustik im Senderraum

Die Raumakustik im Senderraum wurde durch stufenweises Einbringen von Absorbern sowie Diffusoren variiert. Insgesamt kamen acht verschiedene Raumsetups des SR zur Beurteilung – jene vier mit dem größten Einfluss werden nachstehend dargestellt. Die Bezeichnungen jeder Variante sowie die entsprechende Spanne der Nachhallzeit sind in der Tabelle 1 angeführt. Der erste Index der Bezeichnung steht dabei für die Stufe der Absorption und der zweite für die Diffusoren-Stufe; SR00 stellt somit den leeren Senderraum dar. Die Anordnung der Absorber sowie Diffusoren im SR sind in den Abbildungen 1 bis 4 zu sehen. Die zugehörigen Nachhallzeiten sowie die normative Nachhallzeit im SR und der Schwankungsbereich aller untersuchten SR-Varianten sind in Abbildung 5 dargestellt. Der Empfangsraum verblieb für alle Messungen im normativen Setup und wurde nicht verändert. Die Nachhallzeit liegt im normativen Bereich von 1 bis 2 s; die Einbauten sind analog der Variante SRnorm.

Tabelle 1: Überblick der extremen SR-Konfigurationen inkl. Spanne der Nachhallzeit sowie die verwendeten Absorber und Diffusoren

| SR-Variante | Nachhallzeit RT ₅₀₋₅₀₀₀ | Absorber | Diffusoren |
|-------------|------------------------------------|-------------------------------------|--|
| SRnorm | 0,9 - 1,7 s | nach Norm | nach Norm |
| SR00 | 1,1 - 4,8 s | - | - |
| SR02 | 1,0 - 4,2 s | - | 3x 1 m ² + 2x 3 m ² |
| SR22 | 0,4 - 1,3 s | 6x MiWo Paket ≈ 6 m ³ | 3x 1 m ² + 2x 3 m ² |



Abbildung 1: SR-Variante SRnorm: normatives Setup, welches auch für die Messungen nach EN ISO 10140 im Prüfstand verwendet wird



Abbildung 2: SR-Variante SR00: leerer Senderaum, im Messbetrieb bis auf Messeinrichtungen sowie Lautsprecher vollkommen leer



Abbildung 3: SR-Variante SR02: zweite Ausbaustufe der Diffusoren, mit drei Diffusoren je 1 m² in Anlehnung an EN ISO 16283-1 sowie zwei Diffusoren mit je knapp 3 m² wie im CEN-Ringversuch [2] verwendet



Abbildung 4: SR-Variante SR22: zusätzlich zur Variante SR02 die zweite Stufe der Absorber mit Mineralwolle-Paketen in den Ecken sowie an den langen Raumkanten am Boden – insgesamt gut 6 m³ an Mineralwolle

Messmethoden

Im Zuge der Untersuchungen kamen zwei verschiedene Messmethoden zum Einsatz. Die Signalerzeugung wurde in beiden Fällen durch einen Dodekaeder sowie einen Subwoofer bewerkstelligt. Als Signal wurde ein weißes Rauschen verwendet, die Mittelungsdauer der Messung betrug 20 s. Der Frequenzgang der Signalquelle ist nicht entzerrt und kann einer Rückkopplung mit dem Modalfeld im Senderaum unterliegen [9].

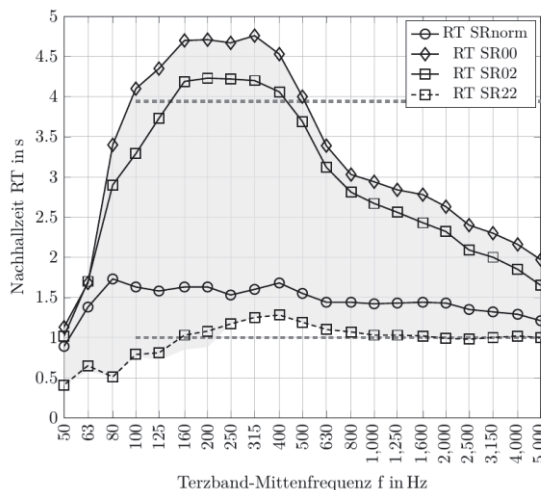


Abbildung 5: Nachhallzeiten der untersuchten Senderaum-Varianten inkl. Darstellung des erweiterten normativen Bereichs der Nachhallzeit (strichliert) sowie die Schwankungsbreite aller untersuchten SR-Varianten (grau). Das SR-Setup SR00 liegt deutlich außerhalb des normativen Bereichs, SR02 sowie SR22 geringfügig

Die erste Messmethode wird mit ‚Norm‘ bezeichnet und ist in Anlehnung an die Vorgaben der Normenreihe EN ISO 10140 entstanden: zwei optimalen Lautsprecherpositionen wurden im leeren Senderaum SR00 ermittelt und für alle weiteren Untersuchungen beibehalten. Laut Norm müssten diese bei jeder Raumänderung neu ermittelt werden. Die beiden Positionen LS1 und LS2 sind in Abbildung 6 in Grundriss inkl. deren Einflussbereich des Direktschallfelds dargestellt. Zur Messung wurden diese nacheinander verwendet.

Weiters kamen jeweils fünf Mikrofonpositionen zum Einsatz, welche sich innerhalb des normativen Bereichs befinden: 0,7 m von den Raumbegrenzungen und 1,0 m vom Prüfbauteil (Abbildung 6, grau). Auch die den LS-Positionen zugeteilten Mikrofonpositionen verblieben für alle Untersuchungen gleich.

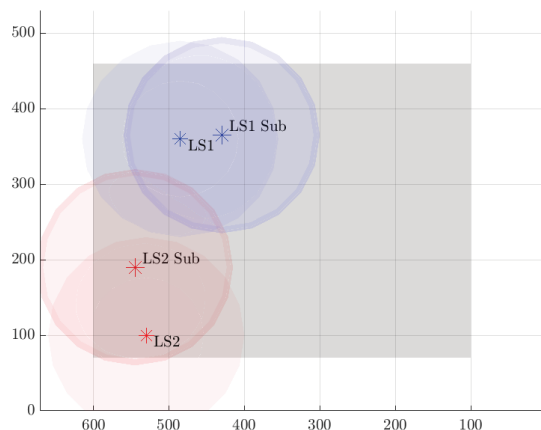


Abbildung 6: Grundriss der im Zuge der Untersuchungen verwendeten Lautsprecherpositionen bestehend aus Dodekaeder sowie Subwoofer inkl. Einflussbereich des Direktschallfelds der Lautsprecher nach EN ISO 10140-4 sowie der normative Bereich der Mikrofonpositionen (grau)

Die zweite Messmethode wird folgend als ‚Raster‘ bezeichnet und repräsentiert ein regelmäßiges Raster mit einer Schrittweite von etwa 0,8 m über das Prüfraumvolumen. Der Abstand zu den Raumbegrenzungen sowie auch zum

Prüfbauteil betrug 0,7 m. Es ergeben sich somit knapp 160 Messpunkte im SR und 192 Messpunkte im ER. In der Messmethode ‚Raster‘ kam lediglich eine Lautsprecherposition zur Untersuchung – diese entspricht der Lautsprecherposition LS1 aus der Messmethode ‚Norm‘.

Ergebnisse

Im Laufe der Untersuchungen hat das Forschungsteam entschieden, den Fokus auf die Schallpegeldifferenz (D) aus dem äquivalenten Schalldruckpegel des SR und ER zu legen. Im Folgenden ist somit nur der Einfluss der Raumakustik im SR ersichtlich. Die nachstehenden Grafiken werden vom 50 bis zum 250 Hz Terzband dargestellt. Dies beruht einerseits auf der unteren Grenze des erweiterten bauakustischen Bereichs; andererseits auf der Schröderfrequenz, welche für den SR des XL-Prüfstands bei rund 250 Hz liegt.

Um die Vergleichbarkeit der Messmethoden ‚Raster‘ und ‚Norm‘ herzustellen, werden in den nachstehenden Grafiken nur die Ergebnisse zur Lautsprecherposition LS1 gezeigt.

Messmethode ‚Norm‘

Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Schallpegeldifferenz in Abhängigkeit der Terzband-Mittenfrequenzen in der Messmethode ‚Norm‘ für die Lautsprecherposition LS1 der vier untersuchten SR-Varianten SRnorm | SR00 | SR02 | SR22. In den tiefen Frequenzen unter 100 Hz zeigen sich größere Abweichungen der stark gedämmten SR-Variante (SR22) vom normativen Setup (SRnorm); die maximale Abweichung beträgt hier 5,0 dB im 63 Hz Terzband. Im 80 Hz Terzband liegt die Abweichung bei 2,9 dB, die Schwankung aller gemessener Varianten liegt bei 4,7 dB. Im 160 und 250 Hz Terzbänder wird der Unterschied durch den leeren Senderraum (SR00) hervorgerufen. Dies kann dadurch begründet werden, dass mit der längeren Nachhallzeit von über 4 s auch die Schröderfrequenz steigt und somit bereits bei höheren Frequenzen ein nicht-diffuses Schallfeld zu erwarten ist [10].

Verwendet man zur Auswertung der Schallpegeldifferenz der Messmethode ‚Norm‘ den Mittelwert aus den Ergebnissen beider Lautsprecherpositionen LS1 und LS2 (hier nicht dargestellt), so zeigt sich ein homogeneres Ergebnis [7]. Die großen Abweichungen im 63 Hz Terzband reduzieren sich auf etwa die Hälfte (2,4 dB), die Abweichungen im 80 sowie im 160 Hz Terzband bleiben allerdings weiterhin bestehen (4,8 bzw. 3,7 dB).

Messmethode ‚Raster‘

Analysiert man die Ergebnisse der Messmethode ‚Raster‘ in Abbildung 8, so stellt sich eine wesentlich geringere Schwankungsbreite in den Terzbändern ein; diese beläuft sich auf maximal 2 dB. Ausgenommen ist das 80 Hz Terzband, hier liegt die Abweichung der SR-Variante SR22 vom normativen Setup SRnorm bei 4,3 dB und bleibt somit auf ähnlichem Niveau wie bei der Messmethode ‚Norm‘.

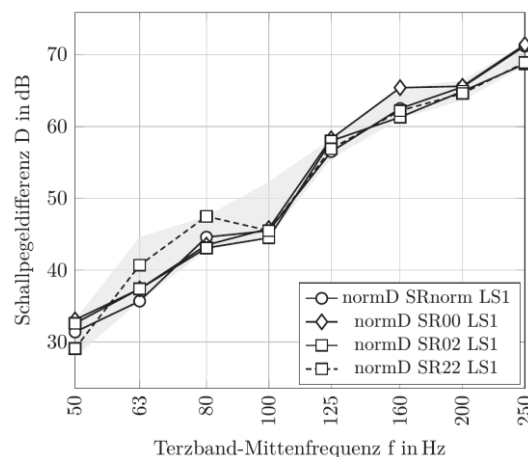


Abbildung 7: Schallpegeldifferenz in dB der vier untersuchten SR-Varianten in der Messmethode ‚Norm‘ ermittelt mit Lautsprecherposition LS1 inkl. Schwankungsbereich aller untersuchten Varianten (grau). Maßgebliche Schwankungen sind in den Terzbänder 63 sowie 80 Hz (SR22) und 160 Hz (SR00) erkennbar

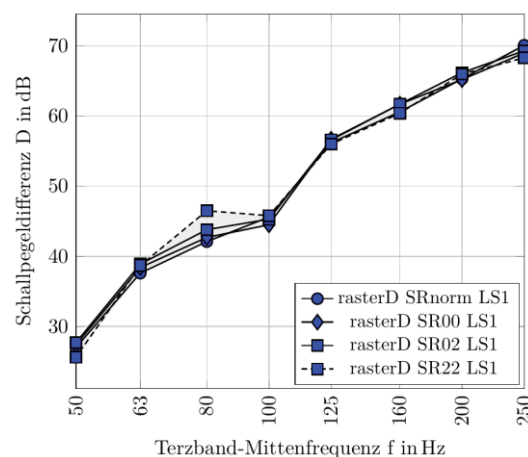


Abbildung 8: Schallpegeldifferenz in dB der vier untersuchten SR-Varianten in der Messmethode ‚Raster‘ ermittelt mit Lautsprecherposition LS1 inkl. Schwankungsbereich aller untersuchten SR-Varianten (grau). Schwankungen sind im 80 Hz Terzband (SR22) ersichtlich

Allgemein ist aus den Schallfeldabtastungen deutlich zu erkennen, dass weder im SR noch im ER ein diffuses Schallfeld vorherrscht. Die exemplarisch dargestellten Schallfelder im SR / ER im 80 Hz Terzband in Abbildung 9 zeigen, dass durch die lokale Absorption in den Ecken des SR gewisse Moden stark bedämpft werden; diese sind praktisch nicht mehr erkennbar. Folglich wird auch die Ausprägung von Moden im Empfangsraum beeinflusst. Somit konnten die generierten Messdaten die Studie von Fuchs [4] bestätigen, dass die gezielt lokal angebrachten Absorber in den Ecken und Kanten eines Raumes im tieffrequenten Bereich wirksam sind.

Laut Fuchs [4] liegt die optimale Dämpfung für Prüfräume ab 50 Hz bei einem mittlerer Absorptionsgrad (α_m) von 0,2. Wird die Bedämpfung verringert (unbedämpft oder normatives Setup; $\alpha_m < 0,15$), so führt dies zu einem kleineren Schalldämm-Maß; eine stärkere Bedämpfung ($\alpha_m \approx 0,4$) bringt etwas höhere Werte.

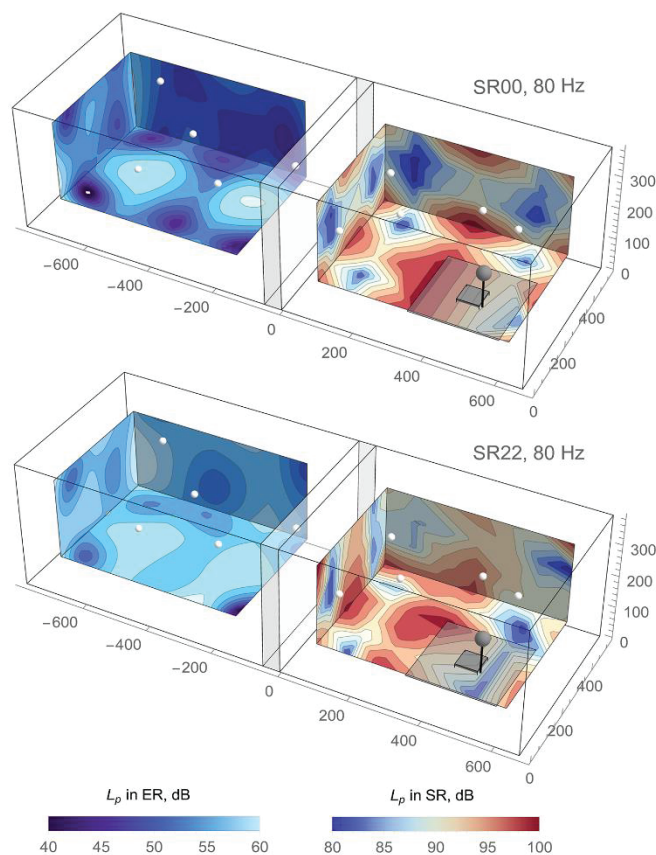


Abbildung 9: Schallfelder im 80 Hz Terzband bei den zwei Extremvarianten SR00 sowie SR22 mit Mikrofonpositionen der Messmethode ‚Norm‘ (weiß) und Lautsprecherbereich (grau). Links: Empfangsraum; Rechts: Senderraum

Diese Beobachtung konnte im Zuge unserer Untersuchungen für die Messmethode ‚Norm‘ bestätigt werden. Ein α_m von 0,2 für den Frequenzbereich von 50 bis 250 Hz spiegelt die stark bedämpfte SR-Variante SR22 wider. Die höhere Schallpegeldifferenz dieser Variante im Vergleich zum normativen Senderraum in den Terzbändern bei 63 und 80 Hz wird allerdings durch zusätzliche Lautsprecher- oder Mikrofonpositionen verringert.

Zusammenfassung und Diskussion

Wird die untere Grenze der Nachhallzeit von 1 s im SR eingehalten (SRnorm, SR00, SR02), so zeigen sich bei der Messmethode ‚Norm‘ nur geringe Schwankungen der Schallpegeldifferenz von 1,8 dB im Frequenzbereich < 100 Hz. Ist dies nicht der Fall, wie in SR22 oder bei absorbierenden Prüfbauteilen, führt das modale Schallfeld im SR bei Anwendung der normativ minimal erforderlichen Mikrofon- sowie Lautsprecherpositionen zu erheblichen Abweichungen von bis zu 4,8 dB in der Schallpegeldifferenz.

Die Erweiterung der oberen Grenze der normativen Nachhallzeit nach der Formulierung in EN ISO 10140-5 für große Prüfvolumina erscheint plausibel. Nur bei zu langen Nachhallzeiten im SR00 ($RT > 4,5$ s) ist die Schallpegeldifferenz bei der Messmethode ‚Norm‘ im 160 Hz Terzband um 3,7 dB höher.

Die Anzahl sowie die Position der Mikrofone ist im tieffrequenten Bereich auch im großen Prüfraum entscheidend für die Qualität der Messung. Dies konnte für

alle SR-Varianten beobachtet werden. Die Messergebnisse bestätigen die numerische Studie von Lluís [8].

Ausblick

Im Zuge dieser Untersuchungen wurden detaillierte Ergebnisse lediglich mit einer Lautsprecherposition erhoben. Die Positionierung der Schallquelle stellt ebenso ein weiteres wichtiges Thema dar. Für die Festlegung von optimalen Positionen der Schallquelle unter 100 Hz im Prüfraum, zum Beispiel mit Hilfe von modaler Dekomposition, fehlt eine einfache standardisierte Anleitung.

Die Variation der Raumakustik im rechteckigen Senderraum löst nicht das Problem der systematischen Abweichungen zwischen Prüfungsumgebungen, die nach EN ISO 10140 gestaltet sind. Der Einfluss der Raumgeometrie sollte auf eine andere Weise minimiert werden, um die Reproduzierbarkeit zu verbessern.

Sämtlichen Daten aus den Untersuchungen in FFT-Auflösung sowie Untersuchungen zu weiteren Lautsprecherpositionen werden in den kommenden Beiträgen zur Verfügung gestellt.

Literatur

- [1] Lechner, C. (2019): Monografie 1. Ringversuch für bauakustische Messungen 2018, ÖAL
- [2] C. Demanet et al (2011): European Round Robin Test for sound insulation measurements of lightweight partition, In: InterNoise September 2011, Osaka.
- [3] Hongisto, V.; Keränen, J., *et. al* (2012): Reproducibility of the Present and the Proposed Single-Number Quantities of Airborne Sound Insulation, *Acta Acustica united with Acustica*, 98(5), S. 811-819.
- [4] Fuchs, H. V.; Zha, X. (2014): Akustische Messräume für einen erweiterten Frequenzbereich, In: *Bauphysik Kalender 2014*, S. 541-577.
- [5] Maluski, S. P.; Gibbs, B. M. (2000): Application of a finite-element model to low-frequency sound insulation in dwellings, *J. Acoust. Soc. Am.*, 108(4), S. 1741-1751.
- [6] Roozen, N. B. *et. al* (2015): Determining radiated sound power of building structures by means of laser Doppler vibrometry, *J. Acoust. Soc. Am.*, 346, S. 81-99.
- [7] Dirnberger, F. (2021): Raumakustik im Senderraum bei Prüfung des Schalldämm-Maßes, Diplomarbeit, Technische Universität Wien.
- [8] Lluís, F.; Martínez-Nuevo, P., *et. al* (2020): Sound field reconstruction in rooms: Inpainting meets super-resolution, *J. Acoust. Soc. Am.*, 148, S. 649
- [9] Allado, M.; Pittet, A.; Boulandet, R. (2020): Study of the low frequency acoustic coupling between a loudspeaker system and a room: how to make the positioning in the room less critical, In: *Forum Acusticum 2020*, Lyon, S. 1315
- [10] Möser, M. (2019): *Bauakustische Messungen*, Springer Vieweg, 1. Aufl. 2018 Edition, Wiesbaden, S. 26