

Einordnung von Methoden zur Bewertung der Qualität diffuser Schallfelder basierend auf Messungen im Modellmaßstab

Linus Staubach¹, Andreas Meier², Jörn Hübelt³

¹ Hochschule Mittweida, 09648 Mittweida, E-Mail: lstaubac@hs-mittweida.de

Müller-BBM Building Solutions GmbH, 82152 Planegg, E-Mail: Linus.Staubach.extern@mbbm.com

² Müller-BBM Building Solutions GmbH, 82152 Planegg, E-Mail: Andreas.Meier@mbbm.com

³ Hochschule Mittweida, 09648 Mittweida, E-Mail: huebelt@hs-mittweida.de

Einleitung

Die Beschreibung der Schallausbreitung in einem Raum gestaltet sich besonders einfach, wenn man voraussetzen darf, dass in ihm ein diffuses Schallfeld herrscht. Die Anwendung spiegelt sich beispielsweise in Hallräumen nach ISO 354 [1] wider. Das diffuse Schallfeld wird dabei benötigt, um die Absorptionseigenschaften von Absorbern oder den Schalleistungspegel von Geräten mit hoher Genauigkeit und Vergleichbarkeit zu bestimmen. Idealerweise gelingt es, bereits bei der Planung solcher Prüfräume optimierte Bedingungen zu finden.

Zur Prüfung des diffusen Schallfelds findet sich in der ISO 354 [1] ein Qualifikationsverfahren für Hallräume. Der Beitrag beschäftigt sich mit alternativen Ansätzen, um diffuse Schallfelder in einem statischen Raumzustand zu analysieren. Dabei finden die Erprobungen in einem Modellhallraum im Maßstab 1:10 statt. Eine Einordnung der Methoden gibt Auskunft über die erwartete Praktikabilität und Genauigkeit.

Grundlagen und Messaufbau

Diffuse Schallfelder sind idealisierte Betrachtungen realer Situationen, die Grundlage vieler Berechnungen und Überlegungen in der Akustik sind. Sie zeichnen sich durch möglichst gleichmäßige Verteilung der im Raum herrschenden Schallenergiedichte aus. Hohe Modendichten, also Eigenfrequenzen des Raumes pro Frequenzbereich sind dafür verantwortlich. Um sie in existierenden Räumen zu erhöhen, können unter anderem schallstreuende Flächen eingebracht werden, die durch unregelmäßige Oberflächen neue Resonanzbilder hervorrufen. In diffusen Schallsituationen fällt - idealisiert betrachtet - an jedem Punkt des Raumes der Schall aus allen Richtungen in gleichen Anteilen ein. In der Realität ist eine Diffusität jedoch erst ab einer bestimmten Frequenz zu beobachten, die auch als Schröderfrequenz bezeichnet wird.

Hallräume nutzen die Eigenschaften eines diffusen Schallfeldes, um Messungen von beispielsweise Absorption oder Schalleistungen möglichst präzise zu gestalten. Weisen die Schallfelder Unregelmäßigkeiten auf, so sind die Größen mit nicht unerheblichen Messabweichungen behaftet. Daraus entsteht die Motivation, Parameter zur Qualifizierung der Diffusität zu finden und sie beispielsweise zum Vergleich verschiedener Prüfräume heranzuziehen. In bisherigen Arbeiten wurden dafür bereits einige Ansätze vorgestellt [2].

Messaufbau

Der Messaufbau basiert auf einem Modellhallraum im Maßstab 1:10, der in mehreren Konfigurationen für Hallraummessungen nach ISO 354 [1] geeignet ist. Das wurde bereits nach dem darin beschriebenen Qualifizierungsverfahren zur „Prüfung der Diffusität“ in Anhang A festgestellt, wobei die Anforderungen in den Modellmaßstab überführt worden sind.



Abbildung 1: Innenansicht des Modellhallraumes mit Kugelsegment-Diffusoren, Mikrofonen und Mini-Dodekaeder

Der Raum besitzt ein Volumen von $V \approx 0,318 \text{ m}^3$, besteht aus melaminharzbeschichteten, 18 mm dicken Multiplexplatten und beinhaltet 18 Streukörper. Die Diffusoren sind als Kugelsegmente in zwei Größen je neun Stück konstruiert. Sie belegen drei Wandflächen, wobei ihnen jeweils eine unbesetzte Wandfläche gegenübersteht. Die kleinen Diffusoren bestehen aus lackiertem Buchenholz und die großen aus Beton. Als besonderes Merkmal können sie nahezu rückstandsfrei an Wände und Decke an- und abmontiert werden können. So sind Änderungen der Diffusoranzahl und daraus resultierend der Diffusität im Raum möglich. Da der Raum im Grundzustand einen rechteckigen Querschnitt besitzt, ist davon auszugehen, dass er ohne Diffusoren starke Modendominanzen aufweist.

Die räumliche Verkleinerung geht messtechnisch mit einer Skalierung des Frequenz- und Zeitbereiches um den Maßstabsfaktor einher. Während die ISO 354 bei der Prüfung der Diffusität einen Frequenzbereich von 500 Hz bis 4000 Hz fordert [1], wird hier der skalierte Messbereich von 5 kHz bis 40 kHz angewandt. In diesem Versuchsaufbau beträgt die obere Grenzfrequenz jedoch 31,5 kHz, um einen Kompromiss zwischen oberer Grenzfrequenz der sechs $\frac{1}{4}$ " Mikrofone bei 20 kHz, der Samplingrate des Messsystems

$f_s = 96 \text{ kHz}$ und dem Betrachtungsbereich darzustellen. Angeregt wird der Raum mit einem Sinus-Sweep, der von einem Dodekaederlautsprecher mit ca. 5 cm Durchmesser abgespielt wird. Zur Positionierung sind zwei aus Draht konstruierte Stative in verschiedenen Höhen im Raum befestigt. Gemessen wird nach den Anforderungen zur Positionierung der Lautsprecher und Mikrofone nach ISO 354 [1]. Hierbei werden Impulsantworten bestimmt und daraus anschließend weitere Parameter errechnet.

Messung

Ziel der Messreihe ist es, den Verlauf eines Parameters in Abhängigkeit einer Diffusionsänderung zu stellen. Dabei orientiert sich die Messreihe an dem Verfahren zur „Prüfung der Diffusität“ in Anhang A der ISO 354 [1]. Hierbei werden sukzessive die kugelsegmentförmigen Diffusoren in den Raum eingebracht. In jedem der 19 Diffusorzustände - vom leeren bis zum mit 18 Diffusoren belegten Hallraum - wurden nun Impulsantworten zwischen den zwei Sender- und sechs Empfängerpositionen gemessen. Um zusätzlich die Auswirkungen eingebrachter Absorption auf die Messparameter zu betrachten, werden in jedem Diffusorzustand jeweils vier Absorberbelegungen durch poröse Absorber gemessen. Sie bestehen aus dem leeren Hallraum, zwei Belegungen mit kleinen Prüfabsorbern aus Basotect und Polyesterwolle und einem flächenmäßig ca. dreifach größeren Absorber aus Polyesterwolle. Hierbei entsprechen die kleinen Absorber den skalierten Prüfkörperanforderungen der ISO 354 [1] mit den Maßen $36 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ ($l \times b \times h$). Der große Absorber ist $64 \text{ cm} \times 51 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ ($l \times b \times h$) groß. Alle Kanten besitzen dabei eine Umrahmung mit einem festen Klebeband.

Während der Messreihe wurde für jeden Diffusorzustand die relative Luftfeuchte, die Temperatur und der Luftdruck bestimmt. Somit besteht im Anschluss die Möglichkeit, die entstandene Luftdämpfung, die in der ISO 9613-1 [3] beschrieben ist, zu korrigieren. Das ist insbesondere bei der Bestimmung von Schallabsorptionsgraden notwendig.

Messparameter

Aus den gemessenen Impulsantworten lassen sich Parameter ableiten, die Aussagen über die Qualität des diffusen Schallfeldes treffen sollen. Dabei liegt hier der Fokus auf monaural berechneten Methoden, die sich in jedem Raum unabhängig einer Raumänderung oder einer Diffusionsänderung messen lassen. Sie beruhen auf verschiedenen theoretischen Grundprinzipien, die mit diffusen Schallfeldern einhergehen. Alternative Ansätze, die Mikrofon-Arrays benötigen, sind hier nicht berücksichtigt.

Absolute Standardabweichung des Schalldrucks

Die Standardabweichung der räumlich verteilten Schalldrücke gibt Auskunft über die Homogenität des Schalls im Raum. Je niedriger ihr Wert, desto diffuser ist das Schallfeld. Grundlage der Betrachtung ist, dass in einem ideal diffusen Schallfeld an jeder Stelle im Raum die gleiche Schallenergiedichte herrscht. In aktuellen Normwerken sind Verfahren zur Qualifizierung von Hallräumen auf Grundlage dieser theoretischen Überlegung sowohl mit dem Schalldruck [4] als auch mit den Schalldruckpegel [5] beschrieben. In

dieser Untersuchung wird statt der Standardabweichung des Schalldruckes die absolute Standardabweichung der Schallenergie untersucht. Sie ist proportional zum Schalldruck und kann aus der aufintegrierten, quadrierten, örtlichen Impulsantwort p_i errechnet werden.

$$E_i = \int_{-\infty}^0 p_i(t)^2 dt \quad (\text{Pa}^2 \text{ s}) \quad (1)$$

Anschließend ergibt sich die räumliche absolute Standardabweichung der örtlichen Schallenergie E_i aus

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [E_i - \bar{E}]^2} \quad (\text{Pa}^2 \text{ s}) \quad (2)$$

mit der Anzahl an Sende- und Empfangskombinationen n und dem räumlichen Mittelwert der Schallenergie \bar{E} . Die Verwendung der Schallenergie kommt dem Messaufwand zugute, da alle untersuchten Parameter aus der Impulsantwort berechnet werden können.

Absolute Standardabweichung der Nachhallzeit

Zweite Methode ist die Betrachtung der Nachhallzeitabweichungen über verschiedene Messpunkte. Sie beruht auf der Überlegung, dass nur bei homogener Verteilung des Schalls durch ausreichend Diffusion das Abklingverhalten an jedem Punkt im Raum gleich ist. Schlussfolgernd soll der Schall im Idealfall nicht aus bestimmten Richtungen oder in verschiedenen Raumabschnitten vom Durchschnitt abweichend abklingen. Dabei werden an allen Sende- und Empfangskombinationen n örtliche Nachhallzeiten T_i ermittelt, aus denen anschließend die absolute Standardabweichung

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [T_i - \bar{T}]^2} \quad (\text{s}) \quad (3)$$

mit dem Mittelwert der Nachhallzeiten \bar{T} errechnet wird. Je niedriger dieser Wert ist, desto höher ist die Diffusität. Das als Referenz dienende Verfahren ist in der ASTM 423-17 [6] für die Decay-Rate beschrieben, dessen mit 60 dB multipliziertes Reziprok die Nachhallzeit darstellt. In dieser Messreihe wird die Nachhallzeit über einen Pegelabfall von 20 dB interpoliert und aus dem Mittelwert der hallkorrigierten Impulsantwort nach Hanyu 2014 [8] ermittelt.

Degree of Time Series Fluctuation

Die dritte Methode der Diffusitätsbestimmung ist der „Degree of Time Series Fluctuation“ (DTF). Er betrachtet die in der Impulsantwort vom Energieabfall abweichenden Energiespitzen. Dazu wird im ersten Schritt eine hallkorrigierte Impulsantwort errechnet, bei der die quadrierte Impulsantwort durch seine rückwärtsintegrierte Form dividiert wird. Es entsteht eine Impulsantwort, die nur die zeitlichen Energiespitzen und keinen Energieabfall darstellt. Anschließend wird das zeitliche Intervall, das Äquivalent zur Nachhallzeitbestimmung vom 5 dB-Punkt aus zum Δx_{T_x-5} dB-Punkt ist, betrachtet und durch seinen Mittelwert

normalisiert [8]. Diese Normalisierung kann im selben Betrachtungsintervall auch nach einem neueren Verfahren mit der momentanen Abklingrate berechnet werden [7]. An dieser nun hallkorrigierten, normalisierten Impulsantwort wird nun ein Energieverhältnis zwischen den Energieanteilen, dessen Spitzenwerte über einem Schwellenwert liegen, zur Gesamtenergie gebildet. Der Schwellenwert, an dem das Verhältnis 0,01 ist, wird als DTF bezeichnet. Der Wert sagt also aus, wie prägnant die stärksten 1 % der einfallenden Energiespitzen im Verhältnis zum Gesamtsignal ausfallen. [7,8] Je niedriger der Wert ist, desto diffuser ist das Schallfeld.

Auswertung

Die Messergebnisse der Parameter sind als Verlauf über die steigende Diffusoranzahl dargestellt. Dabei ist bei allen drei Parametern mit zunehmender Diffusorfläche ein Abfallen der Werte zu vermuten. Das entspricht einer Verbesserung der Diffusität. In Analogie zum Prüfverfahren nach ISO 354 ist auch ein Punkt zu erhoffen, ab dem sich die Diffusität kaum verändert. Alle vier Verläufe der Absorberbelegungen sind dabei dargestellt.

Degree of Time Series Fluctuation

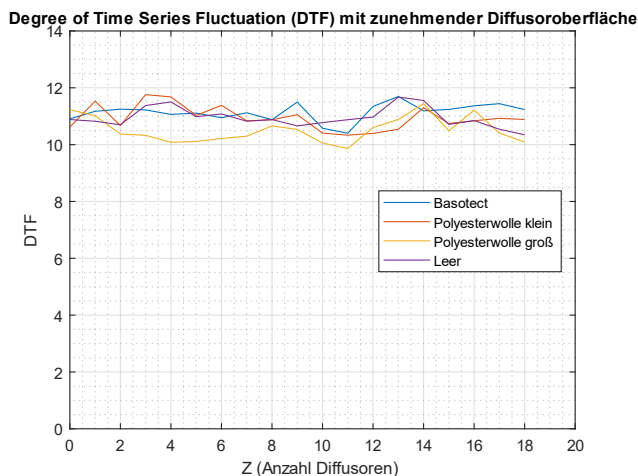


Abbildung 2: Degree of Time Series Fluctuation (DTF) in Abhängigkeit der Anzahl an montierten Diffusoren Z in vier Absorberbelegungen

Beim DTF ist der zu erwartende Verlauf nicht zu beobachten. Er bewegt sich um $DTF \approx 11$, wobei die Abweichungen Messabweichungen repräsentieren. Ebenfalls sind zwischen den Absorberbelegungen keine relevanten Änderungen erkennbar. Der Parameter ist also in dieser Prüfsituation ungeeignet, da keine größeren Schallenergien in kurzen Zeiträumen auf die Mikrofonpositionen auftreten. Das lässt sich auch mit der Form und den Oberflächeneigenschaften des Hallraumes begründen, da er keine angekoppelten Volumen oder abschirmende Elemente besitzt, die solches hervorrufen könnten. Die in Abbildung 2 dargestellten Ergebnisse wurden mit der neueren Berechnungsmethode nach [7] berechnet. Beim Vergleich der beiden Berechnungsmethoden waren in dieser Messreihe keine relevanten Unterschiede erkennbar. Bei diesem Parameter ist es fraglich, inwiefern er Änderungen in einem homogen gestalteten Raum wie einem Hallraum anzeigen kann.

Nachhallzeit mit dessen absoluter Standardabweichung

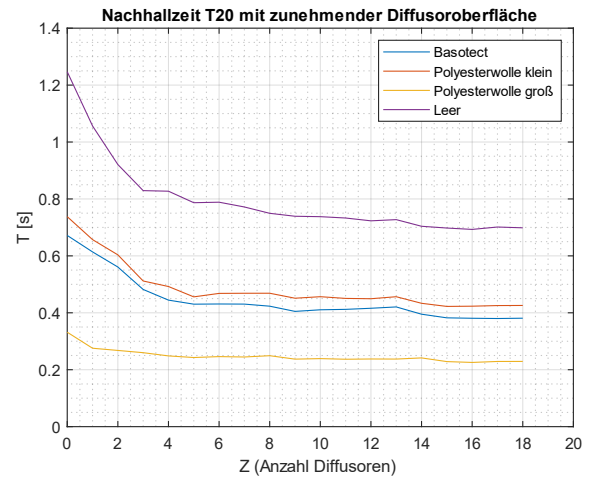


Abbildung 3: Nachhallzeit T20 in Abhängigkeit der Anzahl an montierten Diffusoren Z in vier Absorberbelegungen

Die Nachhallzeit zeigt deutliche Änderungen bei Diffusoränderungen. Sie sinkt bis ca. fünf bis sechs eingebrachten Diffusoren stark ab und ändert sich danach nur geringfügig. Bei steigender Diffusität wird die Modendichte erhöht, weshalb die Schröderfrequenz und damit zusammenhängend die Nachhallzeit des Raumes sinkt. Zwischen den Absorberbelegungen ist dabei gut zu sehen, dass sich bei steigender Absorptionsfläche die Nachhallzeit verringert.

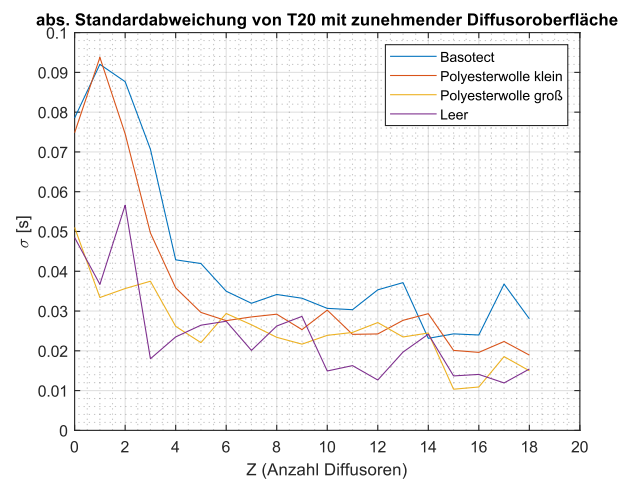


Abbildung 4: räumliche absolute Standardabweichung der Nachhallzeit T20 in Abhängigkeit der Anzahl an montierten Diffusoren Z in vier Absorberbelegungen

Im Verlauf der räumlichen absoluten Standardabweichung der Nachhallzeit sind signifikante Verbesserungen der Diffusion im Hallraum ableitbar. Auch hier ist beispielsweise beim Verlauf mit eingebrachtem kleinen Polyesterwollenabsorber eine deutliche Reduktion der Standardabweichung zu sehen. Sie sinkt von $\sigma_{Z1} \approx 0,09 \text{ s}$ auf $\sigma_{Z6} \approx 0,03 \text{ s}$ ab. Ab sechs bis sieben eingebrachten Diffusoren kann hier von einem ungefähr gleichbleibenden Niveau gesprochen werden, da Messabweichungen den Messwerten überwiegen. Die Beobachtungen fallen beim mit dem kleinen Basotectabsorber belegten Zustand sehr ähnlich

aus. Gesondert sind jedoch die Verläufe im nicht absorberbesetzten Hallraum und dem großen Polyesterabsorber zu betrachten. Die Messwerte im leeren Hallraum ändern sich zwar geringfügig, werden aber von starken Abweichungen überschattet. Es ist tendenziell eine leichte Verbesserung der Diffusion erkennbar, der aber kein Kippunkt zugeordnet werden kann. Beim Vergleich der Wertebereiche von leerem zum absorberbesetzten Hallraum ist ein Indiz ableitbar, dass Absorption, die in einen Hallraum eingebracht wird, keinen positiven Einfluss auf das diffuse Schallfeld hat. Der Verlauf des mit dem großen Polyesterwollenabsorber belegten Hallraum zeigt wie der des leeren Hallraumes eine leichte Verbesserung der Diffusität auf. Sein vergleichsweise niedriger Wertebereich der Standardabweichung ist jedoch in Anbetracht der ebenfalls niedrigen Nachhallzeit deutlich gravierender zu bewerten. Identische absolute Standardabweichungen führen bei geringeren Ausgangsgrößen zu höheren relativen Standardabweichungen.

Absolute Standardabweichung der Schallenergie

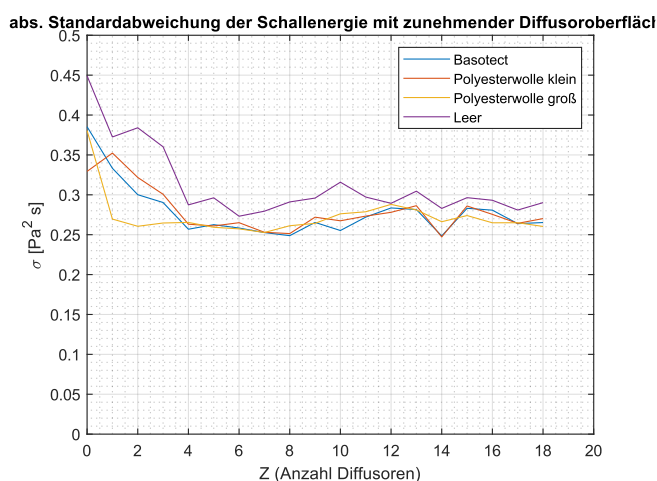


Abbildung 5: räumliche absolute Standardabweichung der Schallenergie in Abhängigkeit der Anzahl an montierten Diffusoren Z in vier Absorberbelegungen

Die räumliche absolute Standardabweichung der Schallenergie deckt sich mit den erhofften Verläufen. Alle vier Absorberbelegungen sinken in den ersten sieben Diffusorzuständen ab und bleiben anschließend auf einem recht konstanten Niveau. Die prozentualen Änderungen im ersten Verlaufsabschnitt fallen zwar geringer aus als die der räumlichen absoluten Standardabweichung der Nachhallzeit, besitzen aber geringere Messabweichungen.

Fazit

Es wurden drei Parameter, die die Qualität eines diffusen Schallfeldes in einem Raum evaluieren sollen, untersucht und in einem Modellhallraum gemessen. Dabei wurde eine Messreihe im Verlauf über die eingebrachte Diffusorfläche durchgeführt und die Ergebnisse dargestellt. Der Degree of Time Series Fluctuation (DTF) zeigt unter diesen Untersuchungsbedingungen bei Zunahme der Diffusorfläche keine Änderung. Er ist daher für die Prüfung von Diffusität in Hallräumen ungeeignet. Aussagekräftiger ist dahingegen die räumliche absolute Standardabweichung der Nachhallzeit,

obwohl sie nur bei eingebrachter Absorption relevante Verläufe anzeigt. Die homogenste Messreihe stellt die räumliche absolute Standardabweichung der Schallenergie dar. Nahezu unabhängig der eingebrachten Absorption ändern sich dessen Werte deutlich im Schema des erhofften Verlaufes.

Für die Planung des Hallraumes resultiert daraus, dass das diffuse Schallfeld mit diesen Messmethoden ab dem sechsten Diffusorzustand eine annähernd gleichbleibende Diffusion erreicht hat. Dabei sind an drei Wänden jeweils zwei Diffusoren angebracht. Die dadurch ermittelte Diffusorkonfiguration deckt sich mit den Ergebnissen der „Prüfung der Diffusität“ in Anhang A der ISO 354 [1].

Ausblick

In einem weiteren Schritt können nun vergleichende Messungen in existierenden Hallräumen durchgeführt werden, um reale Wertebereiche und die Validität zu überprüfen. Außerdem soll es möglich sein, mit den gemessenen Impulsantworten dieser Messreihe zusätzliche Parameter zu prüfen. Dazu sind die Impulsantworten, die Messbedingungen und weitere Informationen zur Messung unter <https://github.com/StauLi/Modellhallraum.git> bereitgestellt.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 354 Akustik: Messung der Schallabsorption in Hallräumen; Deutsche Fassung EN ISO 354:2003. 2003
- [2] S. Zhang & J. Lee: Diffuseness Quantification in a Reverberation Chamber and Its Variation with Fine-Resolution Measurements. *Buildings* 2021, 11, 519. <https://doi.org/10.3390/buildings11110519>
- [3] ISO 9613-1 Akustik: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien; Teil 1: Berechnung der Schallabsorption durch die Luft. 1993
- [4] ASTM E90-09: Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions and Elements. West Conshocken, PA, USA, 2016
- [5] DIN EN ISO 3741 Akustik: Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1; Deutsche Fassung EN ISO 3741:2010. 2010
- [6] ASTM E423-17: Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method. West Conshocken, PA, USA, 2016
- [7] T. Hanyu, K. Hoshi & T. Nakakita: Assessment of sound diffusion in rooms for both time and frequency domain by using a decay cancelled impulse response. *Euronoise*, 2018
- [8] T. Hanyu: Analysis Method for Estimating Diffuseness of Sound Fields by using a decay cancelled impulse response. *Building Acoustics*, 21(2), S. 125–134, 2014