

Verbesserte Berechnung des Schallabsorptionsgrades von Prüfobjekten im Hallraum durch Vermessung und Auswertung der Nicht-Diffusität des Schallfeldes

Barbara Weese¹, Christian Steuck², Uwe Stephenson³

¹ *HafenCity Universität Hamburg, E-Mail: barbara.weese@hcu-hamburg.de*

² *HafenCity Universität Hamburg, E-Mail: christian.steuck@hcu-hamburg.de*

³ *HafenCity Universität Hamburg, E-Mail: uwe.stephenson@hcu-hamburg.de*

Einführung

Seit Jahrzehnten wird der Diffusfeld-Schallabsorptionsgrad von Wandverkleidungen durch Messung der Nachhallzeiten mit und ohne Probe im Hallraum unter Anwendung der Sabine'schen Formel bestimmt (ISO 354). Diese Bestimmungsmethode krankt systematisch daran, dass das Schallfeld nicht diffus ist; die so bestimmten Absorptionsgrade schwanken stark. Zudem täuscht die über dem Absorber systematisch erhöhte Bestrahlungsdichte („Sogeffekt“) einen zu hohen Absorptionsgrad vor.

Schon seit vielen Jahren wird deshalb versucht, die Bestimmung der Absorptionsgrade zu verbessern, indem man versucht, das Schallfeld trotz Absorber im Raum diffus zu halten (siehe zum Beispiel [1], [2], [3]). Dies wird, unter anderem, mithilfe von Diffusoren möglichst zufälliger Oberflächenstruktur und Orientierung, rotierenden Flächen und Schrägstellung der Hallraumwände zueinander versucht.

Jedoch blieben solche Verbesserungsversuche bislang ungenügend. Unser grundlegend neuer Ansatz ist stattdessen, die Nicht-Diffusität des Schallfeldes zu akzeptieren, auszumessen und rechnerisch zu berücksichtigen. Nach Kuttruff wird dabei angenommen, dass der mittlere Absorptionsgrad des Raumes auch mit den lokalen Bestrahlungsdichten gewichtet ist. Diese werden, mithilfe des Messsystems IRIS, durch Auswerten der lokalen richtungsabhängigen Intensitäten bestimmt. Daraus ergeben sich ortsabhängige Korrekturfaktoren für die Rückrechnung von Nachhallzeiten auf den Proben-Absorptionsgrad.

Konventionelle Absorptionsgradbestimmung

Die bekanntesten Nachhallformeln stammen von Eyring und Sabine. Beide setzen ein diffuses Schallfeld (DSF) voraus, welches an zwei Bedingungen gekoppelt ist. Zum einen Isotropie (Richtungsdiffusität), d.h. es soll die Intensität pro Raumwinkel konstant sein, zum anderen Homogenität, d.h. die Energiedichte im Raum soll konstant sein. Ein DSF ist jedoch in Realität nicht erreichbar, da es nur bei Nullabsorption und Totalstreuung nach Lambert erreicht wird. [4]

Aus statistischer Betrachtung ergeben sich zwei zentrale Mittelungsgrößen. Zum einen die mittlere freie Weglänge Λ

$$\Lambda = 4 \cdot V / S \quad (1)$$

mit V als Raumvolumen und S als Raumbooberfläche. Und zum anderen ein mittlerer Absorptionsexponent α'_m

$$\alpha'_m = -\ln(1 - \alpha_m) \quad \text{und} \quad \alpha_m = A / S \quad (2)$$

mit der äquivalenten Absorptionsfläche A , die sich folgendermaßen zusammensetzt:

$$A = \sum_{i=1}^K \alpha_i \cdot S_i + 4m_l V \quad (3)$$

mit α_i = frequenzabhängiger Absorptionsgrad pro Fläche, S_i = Einzelflächen, und m_l = Luftabsorptionsexponent. [4, 5]

Nach Eyring wird, zur Bestimmung der Nachhallzeit T_{60} , ein repräsentatives Schallteilchen und von daher ein stufenförmiger Energieabfall betrachtet. Es ergibt sich:

$$T_{60, \text{Eyring}} \approx 0,163 \cdot \left[\frac{S}{m} \right] \cdot \frac{V}{S \cdot \alpha'_m} \quad (4)$$

Aus der pauschalen Betrachtung eines kontinuierlichen Energieabfalls folgt die Formel nach Sabine [4]

$$T_{60, \text{Sabine}} = 0,163 \cdot \left[\frac{S}{m} \right] \cdot \frac{V}{A} \quad (5)$$

die wegen ihrer Einfachheit meist vorgezogen wird, so auch bei der Bestimmung des Proben-Absorptionsgrades im Hallraum nach ISO 354 [6]. Zuerst wird die Nachhallzeit T_0 im leeren Hallraum gemessen. Es ergibt sich die äquivalente Absorptionsfläche der Raumbooberfläche (ohne Luftabs.)

$$A_0 = 0,163 \cdot \frac{V}{T_0} - 4 \cdot m_l \cdot V \quad (6)$$

und der mittlerer Absorptionsgrad der Hallraumbooberfläche:

$$\alpha_0 = \frac{A_0}{S} \quad (7)$$

Nachdem ein Probenkörper der Fläche S_p (meist 10 - 12m²) angebracht wurde, wird T_m mit Probe gemessen, woraus, nach Gl. (6), die äquivalente Absorptionsfläche A_m berechnet werden kann. Aus der Differenz $A_m - A_0$ ergibt sich die äquivalente Absorptionsfläche der Probe A_p und schließlich nach Gl. (7) der Absorptionsgrad α_p der Probe zu

$$\alpha_p = \frac{A_p}{S_p} \quad (8)$$

Bestimmung der Nachhallzeit nach Kuttruff

Auf der Suche nach einer nächstbesseren Näherung soll nun also kein diffuses Schallfeld mehr angenommen werden. Genauer, es werden zwar noch diffuse Wandreflexionen angenommen, aber keine über alle Oberflächen konstante Bestrahlungsdichte B mehr. Für Bestrahlungsdichten gilt

$$B = I \cdot \cos(\vartheta) \quad (9)$$

wobei I die Intensität der einfallenden Strahlung ist und ϑ der Einfallswinkel zur Flächennormale.

Zur Berechnung der Nachhallzeit muss die orts- und zeitabhängige Verteilung $B(r, t)$ berechnet werden. Hierfür stellte Kuttruff eine Integralgleichung auf. [5] Jene lässt sich jedoch nur numerisch lösen. Auf der Suche nach einer analytischen Lösung leitete Kuttruff einen effektiven, d.h. mit den Bestrahlungsdichten B_i der i -ten Oberfläche gewichteten Absorptionsgrad

$$1 - e^{-\alpha''} = \alpha_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^K \alpha_i S_i B_i}{\sum_{i=1}^K S_i B_i} \quad (10)$$

ab. Dazu müssen neben den Nachhallzeiten die lokalen richtungsabhängigen Intensitäten gemessen werden.

Neuer Ansatz zur Absorptionsgradberechnung

Für den vorliegenden Fall zweier verschieden absorbierender Flächen (Prüffläche S_p und Restfläche S_r) ergibt sich

$$1 - e^{-\alpha''} = \alpha_{eff} = \frac{\alpha_p S_p q + \alpha_r S_r}{S_p q + S_r} \quad (11)$$

Hier wurde (nach Kürzung durch B_r , der Bestrahlungsdichte der restlichen Fläche) der Korrekturfaktor

$$q = \frac{B_p}{B_r} \quad (12)$$

eingeführt, der beschreibt, in welchem Verhältnis der Absorber mehr bestrahlt wird als die restlichen Oberflächen. Mangels Messmöglichkeit wird näherungsweise angenommen, dass über allen restlichen Flächen $B_r \approx I_{diff}/4$ gilt, wobei I_{diff} die Diffusfeld-Intensität ist.

Durch Inversion von Gl. (4) zu

$$\alpha'' = 0,163 \cdot \frac{V}{S \cdot T_{60}} \quad (13)$$

wird α'' und damit α_{eff} bestimmt. Durch Inversion von Gl. (11) ergibt sich der Proben-Absorptionsgrad α_p zu:

$$\alpha_p = \frac{\alpha'' \cdot (S_r + S_p \cdot q) - S_r \cdot \alpha_r}{S_p \cdot q} \quad (14)$$

Die Hypothese ist, dass durch die Einführung ortsabhängiger Korrekturfaktoren q die Ortsabhängigkeit der gemessenen und berechneten Absorptionsgrade gemindert wird.

Hallraum/ Messanordnungen/Absorber

In einem Hallraum wurde zur Untersuchung des Schallfeldes ein Absorber in verschiedener Größe und an unterschiedlichen Orten im Raum ausgelegt und das Schallfeld vermessen. Durch konventionelle Absorptionsgradbestimmung wurden die Absorptionsgrade des leeren Hallraums zu folgenden Werten bestimmt:

	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
T_{60} [s]	7,21	6,69	5,08	3,36	2,31
α_m [-]	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06

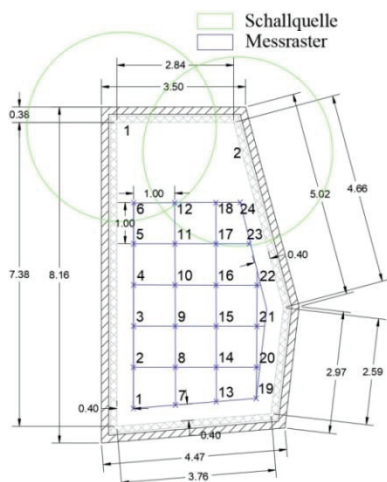


Abb. 1 Darstellung und Benennung der 24 Messpunkte sowie Benennung der Lautsprecherpositionen.

Zweck des in Abb. 1 dargestellten Messrasters war es, möglichst alle wichtigen Punkte im Raum abzudecken; direkt über dem Absorber, an der Kante, neben dem Absorber und in der Nähe des Lautsprechers. Zudem wurde untersucht, inwieweit sich das (nicht) diffuse Schallfeld mit der Höhe über dem Absorber entwickelt (Abb. 2). Dabei wurden die Regeln der ISO 354 bewusst nicht immer befolgt.

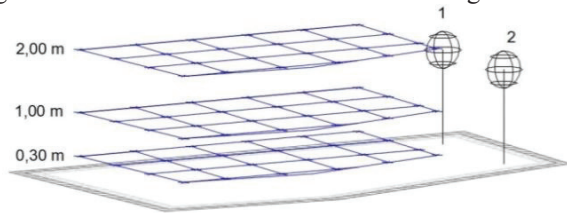


Abb. 2 Messpunkte der Intensitätsverteilungen. Die Nachhallzeiten wurden nur in den Höhen 1,00 und 2,00 m gemessen. 1 und 2 stellen die Lautsprecherpositionen dar.

Messapparaturen

Als Lautsprecher wurde ein Dodekaeder DO12-S verwendet. [7] Als Leistungsverstärker wurde ein AMG Mini [8] verwendet, der auch als Rauschgenerator für rosa Rauschen genutzt werden kann. Für die Nachhallzeitmessungen wurde ein Acoustilyzer AL1 verwendet. Es wird hierbei, unter Verwendung von abgebrochenem rosa Rauschen, T20 gemessen. Das aufgenommene Signal wird intern mithilfe der Schröder Rückwärtsintegration ausgewertet, es wird also eine mittlere Neigung der Abklingkurve bestimmt und daraus die Nachhallzeit berechnet. [9]

Als **Absorber** dienten 10 m² Trennwandplatten „Sonorock“ (Rockwool) in der Dicke 10 cm. [10] Durch konventionelle Auswertung wurden die Absorptionsgrade ermittelt:

	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
α_m [-]	0,65	0,69	0,74	0,83	0,78

IRIS-Messsystem

Das IRIS Messsystem [11] ist ein neuartiges Mess- und Visualisierungssystem zur Erfassung und Analyse von Raumimpulsantworten im dreidimensionalen Raum. Das Herzstück des IRIS Systems ist das TetraMic (Abb. 3).



Abb. 3 Als Tetraeder angeordnete Richtmikrofone.

Abb. 4 zeigt den Aufbau des IRIS Systems. Der MOTU4pre generiert einen Sinus Sweep und gibt diesen weiter an den Lautsprecher. Das TetraMic nimmt das Signal auf und gibt die Daten an das CBM, welches die Daten auswertet. [11]

Interne Prozedur

Das TetraMic nimmt während des Sinus-Sweeps vier Schalldruckkomponenten $P_1(\omega)$ bis $P_4(\omega)$ auf. Durch Division durch das Eingangssignal $S(\omega)$ können die Impulsantworten $G_i(\omega)$ bestimmt werden. Inverse Fourier Transformation liefert für jeden der vier Schalldrücke die Impulsantwort:

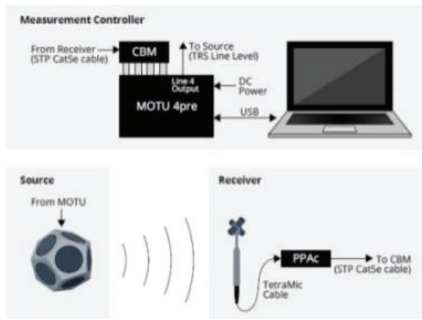


Abb. 4 Grundaufbau des IRIS Messsystems. [11]

$$\underline{G}_i(\omega) \xrightarrow{FFT} g_i(t) \quad (15)$$

Die vier Drucksignale werden tiefen- und hochpassgefiltert, in das kartesische B-Format umgewandelt und zudem in Segmente von 2ms unterteilt. Im nächsten Schritt wird die Schallintensität in X, Y und Z Richtung bestimmt:

$$I_x(t) = p(t) \cdot v_x(t) \quad (16)$$

Wobei $p(t)$ aus dem arithmetischen Mittel der vier Schalldrücke bestimmt wird.

Die dem j -ten Segment zugeordnete x -Komponente der Intensität $I_{sj,x}$ ist das arithmetische Mittel der N_{Seg} Intensitätswerte eines Segmentes:

$$I_{sj,x} = \frac{1}{N_{Seg}} \cdot \sum_{n=0}^{N_{Seg}-1} p_{n,j} \cdot v_{x,n,j} \quad (17)$$

wobei $p_{n,j}$ und $v_{x,n,j}$ Druck und x -Komponente der Schnelle im n -ten Sample und j -ten Segment bezeichnen. Dasselbe Verfahren wird für die Y und Z Richtung angewendet. Es ergibt sich der folgende Vektor: [12]

$$\vec{I}_{sj} = \begin{bmatrix} I_{sj,x} \\ I_{sj,y} \\ I_{sj,z} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Zum Schluss werden die nun berechneten Intensitäten mit Größe und Richtung in einem Plot dargestellt. Beispiele sind hierzu in Abb. 5 zu finden. Aus den Impulsantworten können dann in IRIS auch die üblichen raumakustischen Parameter berechnet werden.

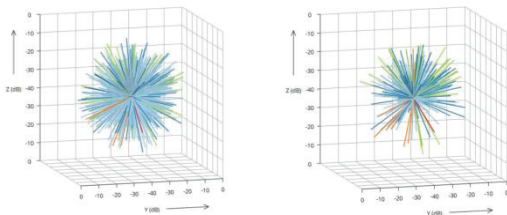


Abb. 5 Beispiele für IRIS-Plots (→genannt: Igel) links diffus (ohne Absorber) rechts nicht diffus (mit Absorber)

Bestrahlungsstärken und Korrekturfaktor q

q kann nicht direkt aus Gl. (12) bestimmt werden, da die Intensitäten als Relativpegel L_j bzgl. des höchsten Pegels aller Zeitfenster („Stacheln“) einer Messung ausgegeben werden. Der Bezugswert der Pegel bei jeder Messung ist damit ein anderer und außerdem unbekannt. Dieses Problem lässt sich so umgehen: Zum einen gibt IRIS auch das lokale Stärkemaß G aus. Jenes ist nach [13] definiert als Pegelerhöhung zur Gesamtintensität in der Impulsantwort relativ zur Freifeldintensität in 10 m Abstand ($r^2 = 100m^2$) [11]:

$$G := 10 \lg \left(\frac{I_{tot}}{I_{10}} \right) \quad \text{mit} \quad I_{10} = \frac{P}{4\pi \cdot 100m^2} \quad (19)$$

Demnach ist

$$\frac{I_{tot}}{P} = \frac{10^{0,1G}}{(400\pi m^2)} \quad (20)$$

mit P als mittlere Leistung der Schallquelle (Sweep-Energie/Sweep-Zeit). Zum anderen sind die energetischen Anteile der Einzelintensitäten

$$a_j = \frac{I_{rel,j}}{\sum_i I_{rel,i}} = \frac{I_j}{I_{tot}} \quad \text{mit} \quad I_{rel,i} = 10^{0,1L_i} \quad (21)$$

unabhängig vom Pegel-Bezugswert.

Erweitert man Gl. (12) mit $1/P$ und drückt B_r mittels der „Diffusfeld-Formel“ als $B_r \approx I_{tot}/4$ aus, ergibt sich

$$q = \frac{B_p/P}{I_{tot}/(4P)} \quad (22)$$

Die interne Größe P muss man also nicht wissen. Die Bestrahlungsstärke B_p auf die Probe ergibt sich als Summe über alle „von oben“ kommenden Intensitätsanteile $I_i(\theta, \varphi)$ (in Polarkoordinaten), d.h. die mit $|\theta| \leq \pi/2$:

$$\frac{B_p}{P} = \frac{1}{P} \sum_i B_i \quad \text{mit} \quad B_i = I_i(\theta, \varphi) \cdot \cos(\theta_i) \quad (23)$$

Dann ergibt sich q durch die Gln. (21) – (23) zu:

$$q = \frac{4(I_{tot}/P)_p \sum_j a_j \cos(\theta_j)}{(I_{tot}/P)_r} \quad (24)$$

wobei die $(I_{tot}/P)_i$ für jeden Messort (Probe oder Restfläche) nach Gl. (20) bestimmt werden.

Messergebnisse: Ortsabhängige Nachhallzeiten

Zur Auswertung der Nachhallzeitmessungen des Acoustilizers wurde aus allen 24 Messungen je Absorberanordnung, Lautsprecherposition und Höhenlage der Mittelwert gebildet. Aus jenen 5 Mittelwerten wurde, wie in Abb. 6 Nr. 1-6 (durchgezogene Linien) dargestellt, der Absorptionsgrad gemäß DIN 354 berechnet.

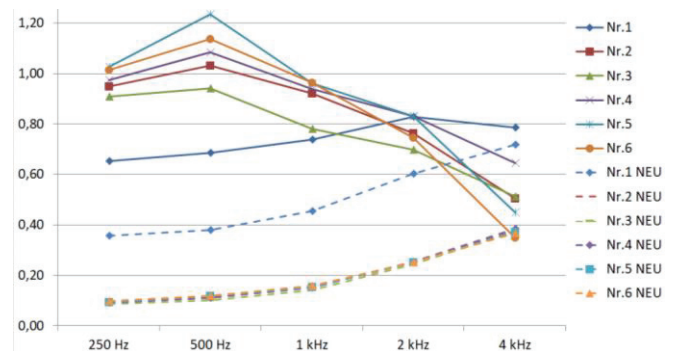


Abb. 6 Absorptionsgrade: Nr. 1-6, durchgezogene Linien, nach Norm berechnet, Nr. 1-6 NEU, gestrichelte Linien, nach der neuen Methode mit ortsabhängigen q -Faktoren

Beim Vergleich der Absorptionsgrade (Abb. 6) untereinander fällt auf, dass die Ähnlichkeit sehr stark vom Frequenzband abhängt. Vor allem in tiefen Frequenzbändern schwanken die Werte erheblich, sie liegen bei den Anordnungen 2-6 um ca. 0,3-0,4 höher als bei Anordnung 1.

Betrachtet man die Standardabweichungen der Mittelungen, also die Schwankungen über den Raum verteilt, so liegen diese beim 250 Hz Band im Bereich von 0,150 bis 0,425, beim 2 kHz Band im Bereich von 0,031 bis 0,072.

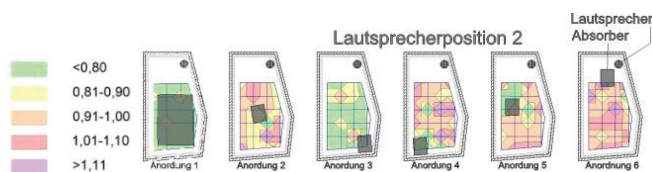


Abb. 7 Unterschied der nach Norm berechneten Absorptionsgrade dargestellt über den Raum (1 kHz Band, Höhe 1,00 m)

Man kann also erkennen, dass die Nachhallzeiten, vor allem in tiefen Frequenzbereichen extrem ortsabhängig sind (s. auch Abb. 7). Somit ergibt sich, je nach Platzierung der Messung, ein anderer Absorptionsgrad, was die Bestimmung ungenau und schlecht vergleichbar macht.

Anisotropie / Bestimmung des Faktors q (IRIS)

Vollständige Isotropie würde bedeuten, dass alle „Stacheln“ des Igels annähernd gleich lang sind (vgl. Abb. 5 links). Die Isotropie des Raums wurde hier anhand der Standardabweichung der „Stachellängen“ definiert. In der Auswertung der Messdaten wurde sichtbar, dass vor allem späte, schwache Reflexionen eine größere Standardabweichung hervorrufen. Zudem wurde sichtbar, dass das Schallfeld in der Nähe der Lautsprecher isotroper ist als am anderen Ende des Raums.

In der neuen Auswertemethode wurde (siehe Gl. (18) – (24)) an jedem Punkt der Faktor q berechnet. Mithilfe der ortsabhängigen Korrekturfaktoren q wurde dann für jeden Messpunkt der ortsabhängige Absorptionsgrad bestimmt. Jene Absorptionsgrade konnten dann gemittelt werden. In Abb. 6 ist ein Vergleich der Absorptionsgradberechnungen dargestellt, die Linien Nr. 1-6 sind nach Norm berechnet, die gestrichelten Linien Nr. 1-6 NEU nach der neuen Methode mit ortsabhängigen q -Faktoren.

Die ortsabhängig korrigierten Absorptionsgrade weisen eine wesentlich geringere Standardabweichung von 0,013 bis 0,080 auf. Vor allem die Kurven der Anordnungen 2-6 liegen quasi aufeinander, die Absorptionsgrade nach der neuen Methode haben sich also extrem angenähert. Die Kurve der Anordnung 1 liegt ca. 0,2 darüber, hat aber einen sehr ähnlichen Verlauf. Zwar sind große Schwankungen von 0,4 – 0,6 bei Absorptionsgradbestimmungen auch bei anderen Projekten wie beispielsweise Round Robin [14] keine Seltenheit, trotzdem ist hier anzumerken, dass die neu berechneten Absorptionsgrade, vor allem der Anordnungen 2-6, für einen starken Absorber sehr gering sind.

Schlussfolgerung

Die Untersuchungen des Schallfeldes haben gezeigt, dass die gemessenen Nachhallzeiten und damit die nach Norm berechneten scheinbaren Absorptionsgrade stark vom horizontalen und vertikalen Abstand zum Absorber abhängen. (Das Schallfeld ist eben nicht diffus.) Zur Lösung dieses Problems wurde der ortsabhängige Korrekturfaktor q eingeführt, der die Ortsabhängigkeit der Messung in die Berechnung mit einfließen lassen soll.

An der Grafik in Abb. 6 kann man erkennen, dass die Absorptionsgrade mit ortsabhängigen Korrekturfaktoren eine wesentlich geringere Streuung aufweisen, als jene die klassisch nach Sabine berechnet wurden. Zudem liegen auch alle nach der neuen Methode berechneten Werte unter 1,00,

was beides Indizien dafür sind, dass die so berechneten Absorptionsgrade dem „wahren“ Absorptionsgrad eher entsprechen könnten, auch wenn der gesuchte Zielwert nicht bekannt ist und die berechneten Absorptionsgrade der Anordnungen 2-6 sehr gering sind.

Im weiteren Verlauf der Forschung könnte genauer untersucht werden, in welchem Rahmen um den Absorber das Schallfeld anisotrop ist. Ein Vorschlag ist in Abb. 8 gezeigt.

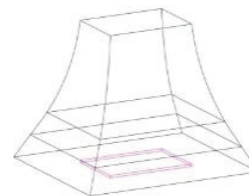


Abb. 8 Anisotropie des Schallfeldes als Volumenkörper
Innerhalb der Hülle (wie z. B. Abb. 8) könnte in einem dichten Raster der Faktor q bestimmt und mit horizontalem und vertikalem Abstand zum Absorber gelistet werden. Hierdurch würde für jeden Messort in einem bestimmten Hallraum ein bestimmter Korrekturfaktor gelten und die Absorptionsgrade könnten genauer bestimmt werden.

Literatur

- [1] Kuttruff, H.: Sound decay in reverberation chambers with diffusing elements, J. Acoust. Soc. Am. 1981, 69, 1716
- [2] Schultz, T. J.: Diffusion in reverberation rooms, J. Sound Vib. 1971, 16(1), 17 - 28
- [3] Vercammen, M.: The effectiveness of diffusors by determining the sound absorption in the reverberation room. NAG, 1997
- [4] Stephenson, U.M.: A rigorous definition of the term “diffuse sound field” and a discussion of different reverberation formulae. Proc. of ICA, Buenos Aires, Argentina, 2016
- [5] Kuttruff, H.: Room Acoustics. Elsevier Science Publishers Ltd., Barking, England, 3rd ed., 1991
- [6] DIN EN ISO 354:2003-12, Messung der Schallabsorption in Hallräumen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2003
- [7] <https://www.akustiktest.de/BAUAKUSTIK-Lautsprecher-DODEKAEDER-DO12--ISO-140-ISO-717-Kugellautsprecher-Luftschall-Daemmmass.shtml>, Zugriff: 16.02.2020
- [8] <https://messtechnik-stratenschulte.de/produkte/leistungsverstaerker-fuer-die-raum-und-bauakustik-mit-akku-f.html>, Zugriff: 16.02.2020
- [9] Acoustilyzer Handbuch. NTi Audio AG, 10/2017
- [10] Trennwandplatte Sonorock - technisches Datenblatt. Rockwool 9/2018
- [11] IRIS User Manual. Marshall Day Acoustics, 05/2015
- [12] Protheroe, D., Guillemin, B. 3D impulse response measurements of spaces using an inexpensive microphone array. Int. Symp. Room Acoustics, Toronto, Canada, 2013
- [13] DIN EN ISO 3382: Akustik - Messung von raumakustischen Parametern; Teil1: Aufführungsräume. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009
- [14] Tompson, D.: Round Robin Project – Research for investigation of absorption measurement deviation. Fontys Hogescholen, 2009