

Klassenraumakustik und Absorberverteilung – Messung und Berechnung

Moritz Späh*, Klaudius Hengst**, Xiaoru Zhou*

*Fraunhofer Institut für Bauphysik, Nobelstrasse 12, 70569 Stuttgart

E-Mail: moritz.späh@ibp.fraunhofer.de

**Knauf Gips KG, Am Bahnhof 7, 97346 Iphofen

Einleitung

Die im März 2016 erschienene Neufassung der DIN 18041 „Hörsamkeit in Räumen“ [1] gibt unter anderem Hinweise und Anforderungen an die akustische Gestaltung von Klassenräumen. In diesen Räumen muss gute Sprachkommunikation möglich sein. Wichtigstes Kriterium ist dafür die Nachhallzeit, für die Anforderungen in Abhängigkeit des Raumvolumens gestellt werden. Wichtig ist dabei auch die Kommunikation von Menschen mit nicht-deutscher Muttersprache und von hörgeschädigten Personen, die mit dem Begriff „Inklusiv“ in der Norm durch eine eigene Berechnungsformel stärker betont wird. Es werden darüber hinaus Hinweise für eine gute Raumakustik gegeben. Den Hörer sollte viel Direktschall und frühe Reflexionen erreichen, wichtig ist auch darauf zu achten, dass keine Flatterechos entstehen können. In Anhang A2 werden Angaben zur Dimensionierung des Raumes gegeben und es wird angegeben, dass der mittlere Schallabsorptionsgrad für die Flächen in den drei Raumdimensionen nicht mehr als um den Faktor 3 abweichen soll, um ein näherungsweise diffuses Schallfeld zu erreichen. Messtechnisch wurden Untersuchungen von Knauf in einem Klassenraum durchgeführt, der mit verschiedenen schallabsorbierenden Bauteilen ausgestattet wurde. Diese Messungen werden hier aufgegriffen und mit den gängigen Berechnungsmethoden für die Nachhallzeit verglichen. Eine detailliertere Beschreibung der Messungen ist in [2] gegeben.

Untersuchter Raum

Die Messungen wurden in einem eigens dafür aufgebauten Muster-Klassenraum mit einer Länge von 10 m, einer Breite von 6,88 m und einer Höhe von 3,10 m durchgeführt. Eine Längswand war die vorhandene Außenwand eines Industriegebäudes aus gedämmter Leichtmetallkonstruktion mit Fenstern, die anderen drei Wände bestanden aus Gipskarton-Ständerwänden, die einseitig doppelt beplankt ausgeführt waren. Die Rohdecke war eine Betonrippendecke, die zwischen den Rippen mit GKB verkleidet war, der Raum hatte einen Betonboden. Der Raum ist in Bild 1 dargestellt.

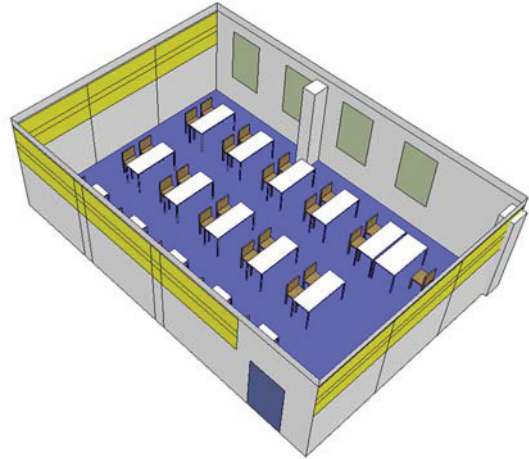


Abbildung 1: Untersuchter Klassenraum der Knauf Gips KG.

Ausstattungsvarianten

Der Raum wurde in insgesamt 18 verschiedenen Ausstattungsvarianten vermessen. Dabei wurden folgende Ausstattungen im Raum variiert: Der Raum wurde im Rohbau gemessen, danach wurden zwei verschiedene absorbierende Unterdecken mit $\alpha_w=0.7$ und $\alpha_w=1.0$ eingebaut. Es wurde mit und ohne Möblierung gemessen und es wurden zusätzlich Wandabsorber im Raum eingebaut, deren Anzahl und Positionierung variiert wurde. In Bild 1 ist eine Variante der Wandabsorber, unterhalb der Decke angebracht, gelb gekennzeichnet dargestellt.

Berechnung der Nachhallzeit

Zur Berechnung der Nachhallzeiten im Raum wurden die gängigen Berechnungsmethoden eingesetzt. Die erste und gängigste ist die nach Sabine. Hier wird ein diffuses Schallfeld im Raum angenommen. Die Nachhallzeit berechnet sich aus dem Raumvolumen V und der äquivalenten Absorptionsfläche A durch:

$$T60_{Sabine} = \frac{0.16 V}{A} \quad (1)$$

Als zweite Methode wurde die Nachhallzeit nach Eyring durch:

$$T60_{Eyring} = \frac{0.16 V}{-S \ln(1-\alpha)} \quad (2)$$

berechnet. Dabei ist S die Oberfläche des Raums und α der mittlere Absorptionsgrad der Oberflächen. Die nächste Berechnungsmethode berücksichtigt die Verteilung der

Absorptionsfläche in die drei Raumrichtungen x , y und z , nach Arau-Puchades:

$$T60_{AP} = \left[\frac{-0.16 V}{-S \ln(1-\alpha_x)} \right]^{\frac{S_x}{S}} \left[\frac{-0.16 V}{-S \ln(1-\alpha_y)} \right]^{\frac{S_y}{S}} \left[\frac{-0.16 V}{-S \ln(1-\alpha_z)} \right]^{\frac{S_z}{S}} \quad (3)$$

Mit S_x , S_y , S_z die Flächenanteile der Oberflächen und α_x , α_y und α_z den mittleren Absorptionsgraden in den entsprechenden Raumrichtungen. Ähnlich ist auch der untersuchte Ansatz nach Fitzroy:

$$T60_F = \frac{0.16 V}{S^2} \left(\frac{-S_x}{\ln(1-\alpha_x)} + \frac{-S_y}{\ln(1-\alpha_y)} + \frac{-S_z}{\ln(1-\alpha_z)} \right) \quad (4)$$

Mit der Berechnungsmethode nach DIN EN 12354-6 Anhang D [3] wurde eine letzte analytische Methode eingesetzt, bei der die Berechnung für tiefe Frequenzen $f < f_t$ nach:

$$T60_{12345-6} = \frac{(55,3) V(1-\Psi)}{c_0 A_{xyzd}} \quad (5)$$

und für höhere Frequenzen $f \geq f_t$

$$T60_{12354-6} = \frac{(T_x + T_y + T_z + T_d)}{4} \geq T_d \quad (6)$$

mit

$$T_{x,\dots} = \frac{55.3 V(1-\Psi)}{c_0 A_{x,\dots}^*} \quad (7)$$

erfolgt. Dabei wird durch Ψ der Volumenanteil von Einbauten im Raum berücksichtigt, in diesen Untersuchungen war $\Psi = 0$. A_{xyzd} stellt die Schallabsorption bei streifendem Schalleinfall dar, $A_{x,\dots}^*$ ist die wirksame Schallabsorptionsfläche für jedes Schallfeld. Details zur Berechnung können [3] entnommen werden. c_0 ist die Schallgeschwindigkeit im Raum. Die Übergangsfrequenz zwischen tiefen und hohen Frequenzen f_t wird berechnet mit:

$$f_t = \frac{8.7 c_0}{V^{1/3}} \quad (8)$$

Messungen

Die Messungen im Raum wurden mittels Dirac durchgeführt. Die Messung der Nachhallzeiten beruht dabei auf Messungen der Impulsantwort. Die Nachhallzeiten wurden in Ohrhöhe der Schüler in einer Mikrofonhöhe von 1,2 m und 1,6 m an insgesamt 7 Mikrofonpositionen in Kombination mit drei Quellpositionen gemessen. Für jede Quellen-Mikrofon-Kombination wurden drei Abklingkurven bestimmt, die geräteintern gemittelt wurden, woraus die Nachhallzeit bestimmt wurde. Insgesamt wurden für jede Messung 21 Nachhallzeiten gemittelt. Bei allen Messungen wurden dieselben Quell- und Mikrofonpositionen verwendet.

Ergebnisse: Vergleich Messung - Rechnung

Für alle Ausstattungsvarianten des Raumes wurde der Vergleich von Messung und Berechnung der Nachhallzeiten mit den beschriebenen Berechnungsverfahren durchgeführt. Eine Auswahl der wichtigsten Vergleiche wird im Folgenden dargestellt. Die Messung und Berechnungen des leeren Raumes ist in Bild 2 dargestellt. Zusätzlich ist mit zwei

dünnen Linien der Anforderungsbereich an die Nachhallzeit nach DIN 18041 für den Klassenraum mit ca. 200 m³ Raumvolumen und für Unterricht inklusiv (Nutzungsart A4) dargestellt. Die mittlere Zielnachhallzeit für diese Nutzungsart beträgt 0.46 s. Zu den Diagrammen ist anzumerken, dass sie doppeltlogarithmisch dargestellt sind.

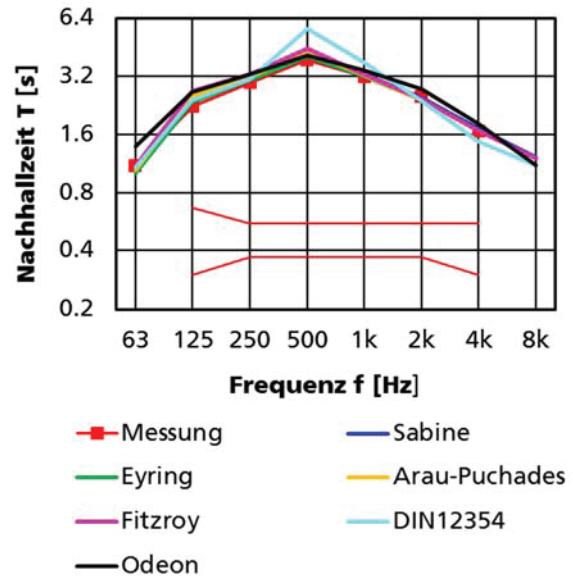


Abbildung 2: Messung (\square) und Rechnung (-) der Nachhallzeit im vollkommen leeren Klassenraum.

Da nicht für alle Raumboflächen verlässliche Angaben zum Absorptionsgrad vorlagen, wurden für diese eine Anpassung der Odeon-Berechnung an die Messung des leeren Raumes vorgenommen. Dies geschah für die GK-Wände und die Außenwand. Für die Verglasungen und die Betonoberflächen wurden in Odeon angegebene Absorptionsgrade verwendet. Die so ermittelten Eingangsdaten wurden auch für die Berechnung mit den anderen Berechnungsmodellen und für die verschiedenen Raumausstattungsvarianten verwendet, die Daten für die Akustik-Unterdecken und die Wandabsorber stammen aus Hallraummessungen nach Angaben der Hersteller.

Im leeren Klassenraum werden im mittleren Frequenzbereich bei 500 Hz Nachhallzeiten von knapp 4 s gemessen. Bei tieferen Frequenzen sind die Nachhallzeiten durch die Raumboflächen aus GK geringer, zu hohen Frequenzen fallen sie ebenfalls ab. Alle Berechnungsmodelle erreichen eine relativ gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Dies ist ein Indiz dafür, dass der Raum zwar eine geringe Schallabsorption aufweist, diese aber gleichmäßig verteilt ist und sich ein diffuses Schallfeld im Raum einstellt. Lediglich die Berechnung nach DIN EN 12354-6 ergibt bei 500 Hz eine etwas längere Nachhallzeit. Grund dafür ist, dass im leeren Raum die Übergangsfrequenz nach Gleichung (8) knapp unter 500 Hz liegt, so dass bei 500 Hz und darüber die Berechnung der Nhz nach Gleichung (6) erfolgt. Dabei ergibt die Berechnung der gemittelten Nachhallzeit etwas längere Werte als die für das diffuse Schallfeld, was in diesem Fall vor allem bei 500 Hz nicht in Übereinstimmung mit den Messwerten ist.

Für die Variante des leeren Raumes mit Akustik- Unterdecke aus Mineralwolle ($\alpha_w = 1,0$) sind die Messwerte und die Berechnungsergebnisse in Abbildung 3 dargestellt.

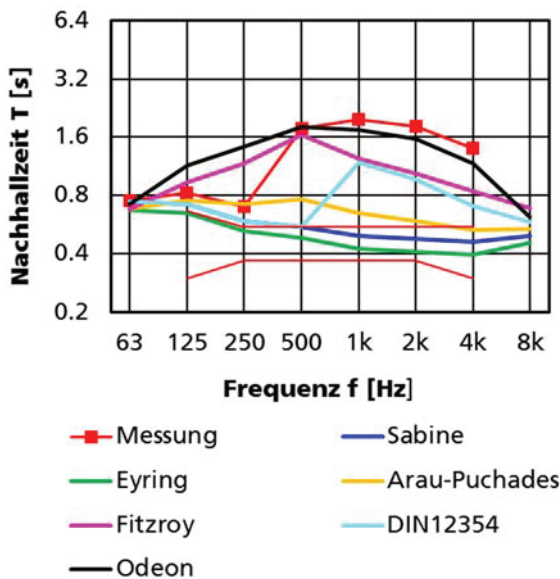


Abbildung 3: Messung (-□-) und Rechnung (-) der Nachhallzeit im leeren Raum mit Mineralwolle-Akustikdecke

Betrachten man hier die gemessene Nachhallzeit, so ist diese im tiefen Frequenzbereich mit Werten um 0,8 s relativ niedrig. Bei 500 Hz steigt sie dagegen deutlich an und erreicht Werte von 1,96 s bei 1 kHz, darüber fällt sie zu hohen Frequenzen leicht ab. Die Berechnung nach Sabine und Eyring ergeben dagegen tieffrequent etwas geringere Nachhallzeiten, bei mittleren und hohen Frequenzen dagegen deutlich kürzere Werte als gemessen, sodass für die Sabine-Berechnung ab 500 Hz schon der empfohlene Bereich der Raumgruppe A4 erreicht wird. Die berechneten Werte nach Eyring liegen noch darunter. Dieser Vergleich zeigt, dass diese beiden Berechnungsverfahren das tatsächliche Verhalten der Nachhallzeit im Raum nicht widerspiegeln, denn sie beruhen auf einem diffusen Schallfeld. Das Schallfeld im Raum mit hoch absorbierender Unterdecke ist dagegen sehr weit davon entfernt. Die Berechnung nach Arau-Puchades liefert etwas längere Nachhallzeiten, die nach Fitzroy deutlich längere. Bei 500 Hz trifft diese Berechnungsmethode in diesem Fall die Messwerte, darunter ist die Nachhallzeit zu lang, darüber zu kurz. Das Modell der DIN EN 12354-6 liefert einen ähnlich abrupten Anstieg der Nachhallzeiten wie die Messung, allerdings bei 1 kHz. Grund dafür ist, dass im Raum mit Unterdecke das verringerte Raumvolumen dazu führt, dass die Übergangsfrequenz nun oberhalb 500 Hz liegt. Dennoch wird die gemessene Nachhallzeit bei 1 kHz nicht erreicht, hochfrequent berechnet DIN EN 12354 zu geringe Werte, die ähnlich zu denen des Berechnungsverfahrens nach Fitzroy liegen. Die Berechnung mit Odeon zeigt bei 125 und 250 Hz zu geringe Werte, darüber allerdings eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten.

Der Vergleich der selben Situation, bei der anstatt der Mineralwolle-Unterdecke die gelochte GK-Akustikunterdecke mit $\alpha_w=0,7$ eingebaut war, ergab sehr ähnliche gemessene Nachhallzeiten, die berechneten Werte für die

Rechenmodelle lagen bei etwas höheren Werten, da sich die Absorptionsgrade der Unterdecken aus dem Hallraum deutlich unterschieden (Die Werte sind in [2] dargestellt). Die Charakteristik des Vergleichs blieb aber sehr ähnlich.

Raum mit Möblierung

Als weitere Variante wurden die Messwerte mit den berechneten Werten für den Fall der Ausstattung des Raumes mit Möblierung untersucht. Beispielhaft ist dies für die Situation mit GK-Akustikunterdecke und Mineralwolleauflage in Bild 4 gezeigt.

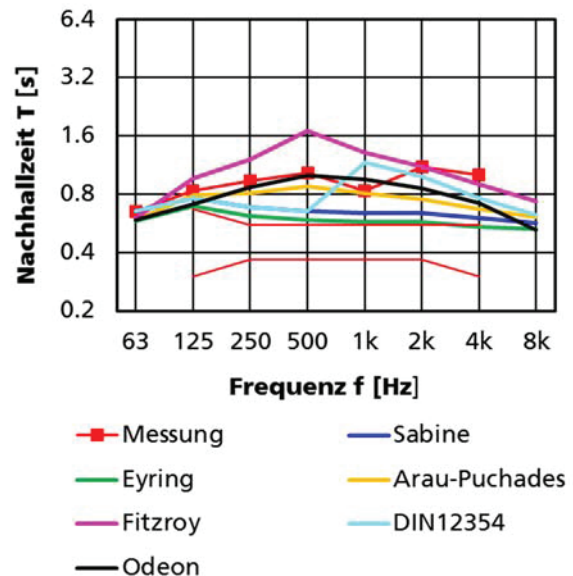


Abbildung 4: Messung (-□-) und Rechnung (-) der Nachhallzeit im Raum mit gelochter GK-Akustikdecke mit Mineralwolleauflage und mit Möblierung

Wird der Raum mit Möblierung ausgestattet, so wird eine größere Anzahl an schallstreuenden Elementen in den Raum eingebracht, die neben etwas zusätzlicher Absorption vor allem die Diffusität des Schallfelds deutlich steigert, so dass eine schallabsorbierende Unterdecke deutlich größere Wirkung zeigen kann. Damit vermindert sich die Nachhallzeit im Raum deutlich. Dennoch liegt sie über dem von DIN 18041 geforderten Bereich für A4 und erreicht bei 2 kHz eine Nachhallzeit von 1,1 s. Auch liegt diese gemessene Nachhallzeit noch deutlich über den nach Sabine und Eyring prognostizierten Werten, was als eine Folge der noch unzureichenden Diffusität im Raum interpretiert werden kann. Die Berechnung nach Arau-Puchades liefert tieffrequent bis 1 kHz in diesem Fall eine recht gute Übereinstimmung mit den Messwerten, oberhalb werden die Werte zu kurz berechnet. Die Berechnung nach Fitzroy liegt im mittleren Frequenzbereich bei zu langen Nachhallzeiten. DIN EN 12354 zeigt in der Nachhallzeit einen Sprung zu längeren Werten bei 1 kHz, der Verlauf stimmt damit nicht mit den gemessenen Werten überein. Die Abweichung bei 250 und 500 Hz zu den Messwerten ist relativ groß. Die Berechnung mit Odeon liegt bis 1 kHz recht gut bei den Messwerten, darüber prognostiziert sie etwas zu kurze Nachhallzeiten.

Als weitere wichtige Maßnahme, die Nachhallzeit im Raum in den nach DIN 18041 geforderten Bereich zu bringen, ist

der Einbau von Wandabsorbern in beide Raumrichtungen, d.h. an der Längs- und den Querwänden, siehe Abbildung 1. Die Absorber wurden direkt unter der Decke, und in einer weiteren Messung auf „Ohrhöhe“ in der Mitte der Wandflächen angebracht. Beispielhaft sind die Messergebnisse der Absorber auf Ohrhöhe in Bild 5 dargestellt.

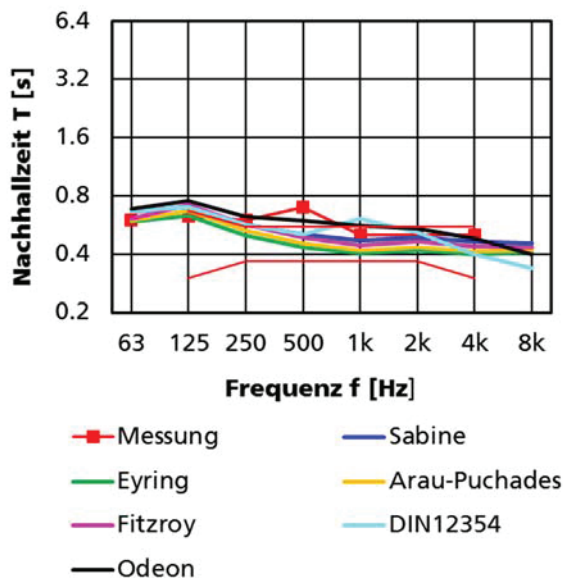


Abbildung 5: Messung (-□-) und Rechnung (-) der Nachhallzeit im Raum mit gelochter GK-Akustikdecke mit Mineralwolleauflage, mit Möblierung und mit Wandabsorbern auf Ohrhöhe

Durch diese Maßnahme wird nicht nur weitere Schallabsorption in den Raum eingebracht, sondern es wird auch die Verteilung der Schallabsorption in alle drei Raumrichtungen deutlich ausgeglichener. Zusätzlich wirken die Wandabsorber als Streukörper. Alles trägt dazu bei, dass das Schallfeld diffuser wird und die Nachhallzeit deutlich geringer ausfällt. Damit wird nun fast im gesamten Frequenzbereich der Anforderungsbereich nach DIN 18041 A4 erreicht, mit Ausnahme bei 500 Hz, wo die Nachhallzeit noch länger als die Anforderung und die prognostizierten Nachhallzeiten ist. Hier wird angenommen, dass das Schallfeld immer noch nicht diffus genug ist. Mit Besetzung entschärft sich dieses Problem, siehe [2].

Der Vergleich der verschiedenen Berechnungsmodelle für diese Situation zeigt, dass die Unterschiede deutlich kleiner werden. Dennoch bleibt die Charakteristik ähnlich, d.h. die Berechnung nach Eyring liefert die kürzesten Nachhallzeiten, Arau-Puchades in diesem Fall etwas längere Werte, Fitzroy liefert noch etwas längere Werte, die aber hier oberhalb 500 Hz noch etwas unter denen von Sabine liegen. DIN EN 12354 liefert tieffrequent bis 500 Hz ähnliche Werte zu Sabine und prognostiziert bei 1 kHz etwas längere Nachhallzeiten als gemessen, und zu hohen Frequenzen eine deutliche Reduktion der Nachhallzeiten. Auch hier liegt der Sprung zu höheren Nachhallzeiten eine Oktave zu hoch. Die Berechnung mit Odeon liefert ebenso eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten, allerdings kann es die etwas längere Nachhallzeit bei 500 Hz ebenfalls nicht nachbilden.

Zusammenfassung

Der Vergleich von verschiedenen Berechnungsmethoden mit Messwerten für einen Klassenraum mit verschiedenen Ausstattungsvarianten von Akustik-Unterdecken, Wandabsorbern und Möblierung zeigt eine typische Charakteristik. Die Berechnung nach Eyring liefert die kürzesten Nachhallzeiten und damit kürzere Werte als die Berechnung nach Sabine, wobei beide Methoden ein diffuses Schallfeld im Raum voraussetzen. Ist dies durch die Ausstattung des Raumes nicht gegeben, z.B. weil nur an der Decke hohe Schallabsorption vorhanden ist, ergeben beide Berechnungsmethoden deutlich zu kurze Nachhallzeiten. Dies ist vor allem für den Planungsprozess wichtig, so dass die „Faktor 3 Regel“ der DIN 18041 unbedingt beachtet werden sollte, siehe auch [2]. Die Berechnung nach Arau-Puchades führt zu etwas längeren Nachhallzeiten, die aber für Räume mit ungleichmäßiger Absorberverteilung in der Regel zu kurz sind. Die Berechnung nach Fitzroy liefert (mit Ausnahme der Odeon-Simulation) unter den verglichenen Methoden die längsten Nachhallzeiten, die auch länger als die Messwerte ausfallen können, wenn viele Streukörper im Raum vorhanden sind, siehe z.B. Bild 4 (die aber im Modell auch nicht berücksichtigt werden können). Die Berechnung nach DIN EN 12354 bildet einen abrupten Anstieg der Nachhallzeit bei mittleren Frequenzen im Falle ungleichmäßiger Absorberverteilung nach, allerdings lag für diesen Raum der Anstieg um eine Oktave gegenüber der Messung zu hoch, da die Übergangsfrequenz etwas über 500 Hz lag. Die Simulation mit Odeon lag in den meisten untersuchten Fällen in guter Übereinstimmung mit den Messwerten, dennoch gab es auch hier bei einzelnen Frequenzen Abweichungen. Der damit verbundene deutlich größere Modellieraufwand scheint daher für solche Räume nicht immer gerechtfertigt. Deshalb wäre die Entwicklung eines einfachen Berechnungsmodells, das die Situation der ungleichmäßigen Absorberverteilung in Rechteckräumen besser abbildet, für die Planungspraxis hilfreich, um die Problematik einer ungleichmäßigen Verteilung zu veranschaulichen und um die Sicherheit des Planungsprozesses deutlich zu erhöhen.

Literatur

- [1] DIN 18041:2016: Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung. Beuth Verlag Berlin.
- [2] K. Hengst, M. Späh, X. Zhou: Klassenraumakustik und Absorberverteilung - Messungen. Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, München.
- [3] DIN EN 12354-6:2004: Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften. Teil 6: Schallabsorption in Räumen. Beuth Verlag Berlin.