

# Klassenraumakustik und Absorberverteilung - Messungen

Klaudius Hengst<sup>1</sup>, Moritz Späh<sup>2</sup>, Xiaoru Zhou<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Knauf Gips KG, 97346 Iphofen, E-Mail: hengst.klaudius@knauf.de

<sup>2</sup> Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, 70569 Stuttgart, E-Mail: moritz.spah@ibp.fraunhofer.de

## Einleitung

Wird von einem Standard-Klassenzimmer ausgegangen, steht der Planer vor der Herausforderung die Nachhallzeiten so einzustellen, dass möglichst nicht nur die normalen Anforderungen nach DIN 18041 [1], sondern darüber hinaus die für Inklusion erfüllt werden.

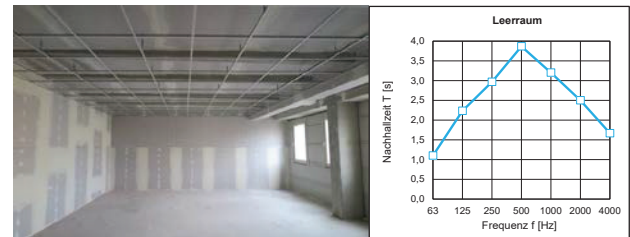
Bei Sanierungsfällen ist es in der Regel noch einfach möglich die reale Nachhallzeit im Raum zu ermitteln. Im Rahmen von Neubaumaßnahmen muss sich der Akustiker bei der Planung auf Annahmen und Berechnungen des zukünftigen Raumes verlassen. In den meisten Fällen wird für die Prognose der Nachhallzeit die Annahme eines ideal diffusen Schallfeldes getroffen und die Berechnung nach Sabine [5] durchgeführt. Für den leeren Raum mit schallharten Oberflächen mag dies noch zutreffend sein. Spätestens nach Einbringen einer hochabsorbierenden Akustikdecke ist diese Annahme unzutreffend.

Wie die nachfolgenden Untersuchungen nahelegen, kann auch nicht davon ausgegangen werden, dass durch das Einbringen von Mobiliar, Wandabsorbern und/oder Personen die äquivalente Absorptionsfläche im Raum näherungsweise gleichverteilt bzw. das Schallfeld im Raum ausreichend diffus ist, um Prognosen, wie sie im ideal diffusen Schallfeld zutreffen, zu rechtfertigen.

In einem umfangreichen Projekt von Knauf wurden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IBP Stuttgart am Beispiel eines Klassenzimmers die Konsequenzen, die sich aus Prognosen unter der Annahme eines ideal diffusen, im Vergleich zum real existierenden Schallfeld ergeben, untersucht. Hierbei wurden Messungen in einem eigens dafür gebauten Musterraum mit Akustikdecken der Absorberklassen A und C (bewerteter Absorptionsgrad  $\alpha_w = 1,00$  und  $0,70$ ), mit und ohne Wandabsorber, sowie mit und ohne Möblierung durchgeführt. Die Messungen wurden auch mit unterschiedlichen Berechnungsverfahren verglichen [6].

## Projekt Klassenzimmerakustik

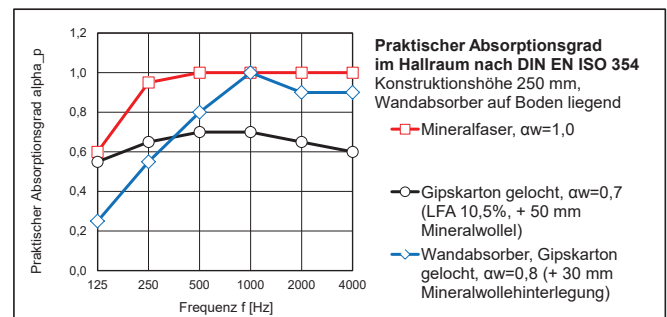
Zur Untersuchung verschiedener Absorbervarianten wurde ein Musterklassenraum mit den Abmessungen 10,0 m x 6,9 m x 3,1 m (LxBxH) errichtet (vgl. Abb. 1). Die Betondecke des Gebäudes wurde zwischen den Trägern mit Gipskartonplatten abgehängt. Drei Wände bestehen aus zweilagig beplankten Gipskarton-Ständerwänden, die Fassade aus einer gedämmten Leichtmetallkonstruktion mit Fenstern. Der Boden besteht aus Beton. Die 625 mm Rasterdecke wurde 250 mm von der Rohdecke abgehängt, so dass sich eine lichte Raumhöhe von 2,85 m und ein Raumvolumen von ca. 200 m<sup>3</sup> ergeben.



**Abbildung 1:** Links: leerer Klassenraum mit Unterkonstruktion einer Rasterdecke, Blick auf die Rückwand; rechts: gemessene Nachhallzeit im leeren Raum wie links abgebildet.

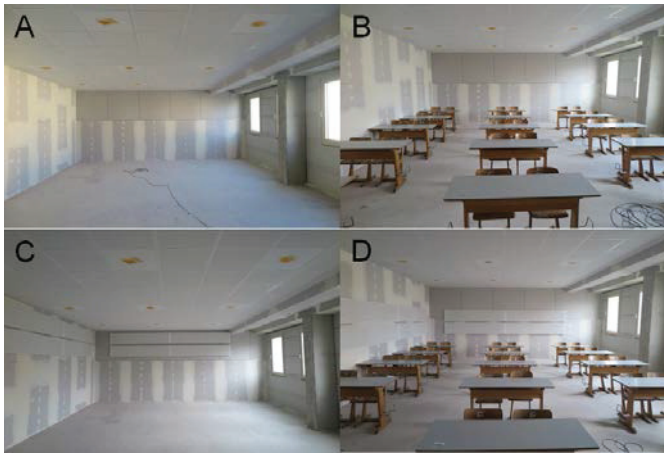
## Materialien, Messtechnik, Messpositionen

Als Akustikkassettendecken wurden zum einen ein Produkt aus 40 mm Mineralfaser (MF,  $\alpha_w = 1,0$ ), zum anderen eine gelochte Gipskartonkassette (GK, LFA 10,5 %) mit 50 mm Mineralwollehinterlegung ( $\alpha_w = 0,7$ ), eingesetzt. Die Wandabsorber (Länge 0,45 m x Breite 2,4 m x Höhe 55 mm) bestehen ebenfalls aus gelochtem Gipskarton, hinterlegt mit 30 mm Mineralwolle. Die im Hallraum nach [4] gemessene frequenzabhängige Absorption der Akustikdecken und der Wandabsorber ist in Abb. 2 dargestellt. Die Wandabsorber wurden jeweils an der Rückwand (4 Stück), an der Seitenwand (6 Stück) und an der Tafelwand (4 Stück) angebracht. Der Raum wurde mit 16 Tischen und 30 Stühlen ausgestattet.



**Abbildung 2:** Im Hallraum [4] gemessene praktische Absorptionsgrade  $\alpha_p$  der eingesetzten Akustikdecken und Wandabsorber.

Die Bestimmung der Nachhallzeit erfolgte nach [2]. Es wurden Messungen aus jeweils 21 Lautsprecher-Mikrofonkombinationen gemittelt und die Nachhallzeiten T30 ausgewertet. Die Mikrofonhöhen waren an die Hörerpositionen angepasst und betrugen 1,2 m bzw. 1,6 m. Die genauen Messpositionen finden sich in [7].



**Abbildung 3:** Beispielhafte Raumsituationen: **A:** Raum mit Akustikdecke ohne Möblierung, ohne Wandabsorber, **B:** Raum mit Akustikdecke mit Möblierung, ohne Wandabsorber, **C:** Raum mit Akustikdecke ohne Möblierung, mit Wandabsorbern „unter der Decke“, **D:** Raum mit Akustikdecke mit Möblierung, mit Wandabsorbern auf „Ohrhöhe“ (entspricht Mikrofonhöhen innerhalb der Ober- und Unterkante der Wandabsorber).

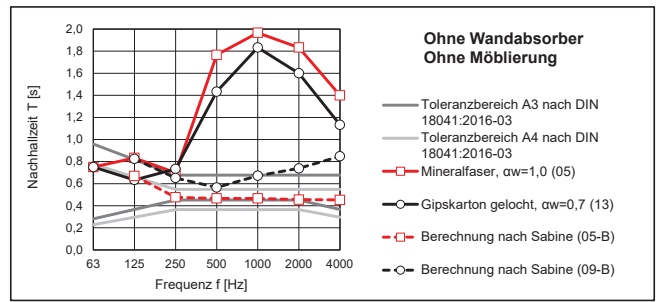
### Absorption, Schallstreuung und Diffusität

In der Realität ist das Schallfeld der wenigsten Räume so diffus wie das in einem Hallraum. Im Gegenteil, je mehr Absorption in einem Raum an einer Fläche angebracht wird, desto weniger diffus wird es. Es stellt sich die Frage, wie diffus das Schallfeld im akustisch zu konditionierende Raum ist bzw. nach der Einbringung der Akustikmaßnahme wird und in welchem Maße Produkte die im Hallraum [4] gemessene Schallabsorption in einem nicht ideal diffusen Schallfeld erbringen?

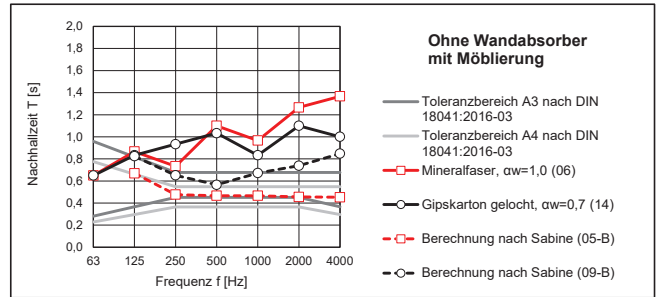
Die durchgezogenen Linien der folgenden Grafiken (Abb. 4 bis Abb. 7) bilden die oktavbandgemittelten, gemessenen Nachhallzeiten ab. Die gestrichelten Linien sind Berechnungen, auf Grundlage der Messung. Das heißt, es wurde zu dem gemessenen leeren Raum (vgl. Abb. 1) die jeweilige Akustikmaßnahme (vgl. Abb.2) nach Sabine hinzugerechnet. Es wurde ohne zusätzliche Belegung mit Personen gerechnet. In fast allen Diagrammen sind die Toleranzgrenzen für Räume der Nutzungsarten A3 und A4 (Klassenzimmer Inklusiv) entsprechend DIN 18041:2016-03 [1] eingezeichnet.

Die folgenden vier Abbildungen (Abb. 4 bis Abb. 7) zeigen systematisch den Einfluss von Möblierung und Wandabsorbern, abhängig von der jeweiligen Akustikdecke, im Raum.

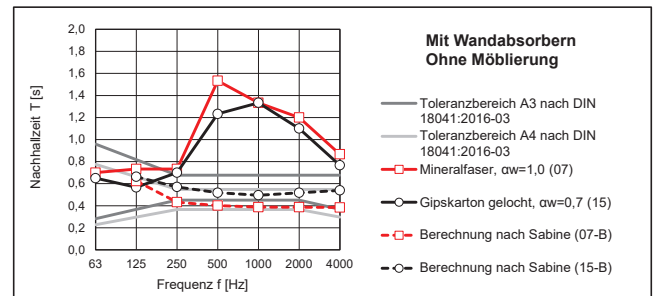
Schulbänke und Stühle erhöhen den Anteil der äquivalenten Absorptionsfläche im Raum nur unwesentlich, wirken jedoch schallstreuend und machen damit das Schallfeld diffuser. Damit werden die gemessenen Nachhallzeiten kürzer und liegen näher an den berechneten Ergebnissen. Es stellt sich die Frage, ob damit ein ausreichend diffuses Schallfeld im Raum entsteht, um eine Prognoseberechnung nach Sabine rechtfertigen zu können?



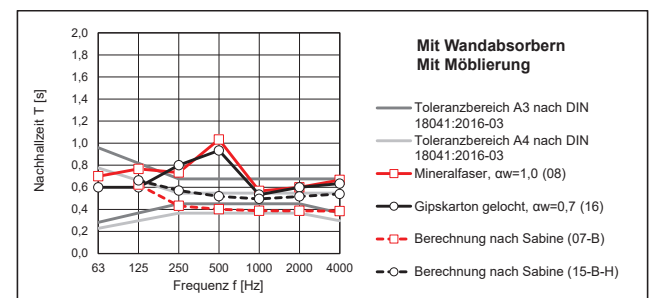
**Abbildung 4:** Raum mit MF- und GK-Akustikdecken, ohne Wandabsorber, ohne Möblierung (Abb. 3-A).



**Abbildung 5:** Raum mit MF- und GK-Akustikdecken, ohne Wandabsorber, mit Möblierung (Abb. 3-B).



**Abbildung 6:** Raum mit MF- und GK-Akustikdecken, mit Wandabsorbern, ohne Möblierung (Abb. 1-C).



**Abbildung 7:** Raum mit MF- und GK-Akustikdecken, mit Wandabsorbern, mit Möblierung.

In Abb. 2 sind die Absorptionsgrade der Akustikprodukte dargestellt. Es fällt jedoch in allen Diagrammen auf, dass sich die im Hallraum mit höheren Absorptionsgraden gemessene A-Akustikdecke ( $\alpha_w = 1,0$ ) im Musterraum praktisch kaum von Messungen mit der C-Akustikdecke ( $\alpha_w = 0,70$ ) unterscheidet. Auffällig ist der deutliche Unterschied von Berechnung und Messung. So suggeriert die Berechnung nach Sabine mit der A-Akustikdecke und Wandabsorbern (vgl. Abb. 4/5) in den Toleranzgrenzen für

Inklusion (Nutzungsart A4) zu liegen. Praktisch liegen Berechnung und Messung deutlich auseinander und auch bei der Variante mit Möblierung klar außerhalb des Anforderungsbereiches.

Das Einbringen von Wandabsorbern verbessert die akustische Situation durch die hinzukommenden schallstreuenden Eigenschaften mindestens genauso, wie durch die zusätzliche äquivalente Absorptionsfläche (vgl. Abb. 6/7). Für den Raum mit C-Akustikdecke liegt die Nachhallzeit näher bei den Prognosewerten als im Raum mit A-Akustikdecke, hier ist sie noch deutlich von der Prognose nach Sabine entfernt.

### Positionierung von Wandabsorbern

Der Einfluss der Absorberpositionierung wird in Abb. 8 deutlich. Ohne weitere Absorptionsflächen in den Raum zu bringen, verringert sich die gemessene Nachhallzeit signifikant, wenn die Wandabsorber auf „Ohrhöhe“ angebracht werden. Bei der Ausstattung mit der C-Akustikdecke wird nun fast die Nachhallzeitprognose erreicht. Bei der A-Akustikdecke bleibt noch immer eine offensichtliche Differenz zwischen Messung und Berechnung, da die Absorberverteilung offenbar immer noch nicht gleichmäßig genug ist und nicht genügend Streukörper im Raum vorhanden sind.

Die durchgezogenen und die gepunkteten Linien in Abb. 8 zeigen gemessene, die gestrichelte die nach Sabine berechnete, Nachhallzeiten. Der Unterschied zwischen durchgezogener und gepunkteter Linie ist einzig die Höhe in der die Wandabsorber montiert waren (vgl. Abb. 3-D).

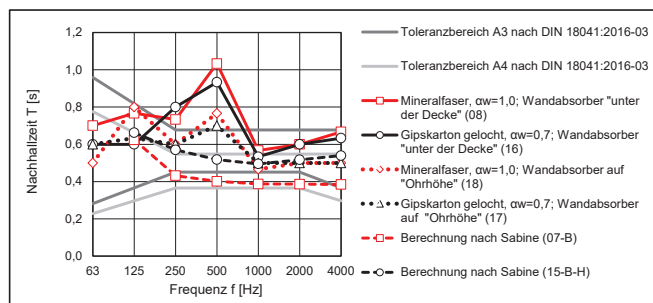


Abbildung 8: Einfluss der Wandabsorberpositionierung auf die Nachhallzeit.

Die Ursache für die längere Nachhallzeit bei 500 Hz ist vermutlich die unzureichende Diffusität des Schallfeldes im Raum. Die Messungen mit Wandabsorbern an unterschiedlichen Positionen und im besetzten Zustand (vgl. Abb. 10) untermauern diese Annahme. Überdies war es bei weiteren Messungen möglich, die Nachhallzeit bei 500 Hz durch schallstreuende Elemente im Raum deutlich zu senken und an die Berechnung nach Sabine anzugleichen.

Weiterhin wurde im Raum der Speech Transmission Index (STI) bei Quellpositionen am Lehrertisch und vor der Tafel im Klassenraum untersucht. Dabei war das Hintergrundgeräusch bei allen Messungen ähnlich. Die Ergebnisse in Abb. 9 machen deutlich, dass ein akustisch gut konditionierter Raum zu einer signifikant besseren

Sprachverständlichkeit führt, als ein Raum ohne Akustikmaßnahmen. Ob in dem Raum eine Akustikdecke mit einem  $\alpha_w = 1,0$  oder  $0,7$  verbaut ist führt zu keinem wesentlichen Unterschied in diesem Einzahlwert. Offenkundig und unabhängig von der Akustikdecke ist jedoch der Unterschied zwischen dem STI an einem der vorderen und einem der hinteren Plätze (z.B. vgl. Pos. S1E1: STI = 0,8 und Pos. S1E2 STI = 0,6, mit einem Sender-Empfänger Abstand von S1E1 = 1,5 m und S1E2 = 8 m). Damit ergibt sich, dass Personen mit eingeschränkten Hörfähigkeiten im Klassenraum möglichst mit kurzer Distanz zum Sprecher sitzen sollten.

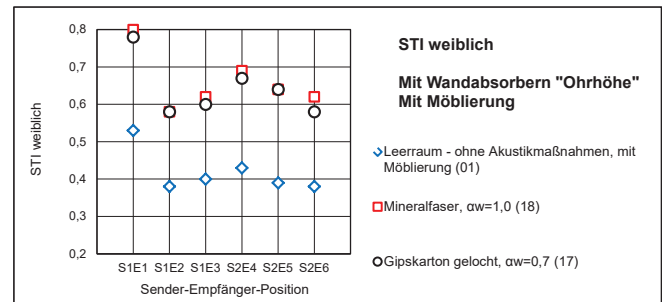


Abbildung 9: Messergebnisse Speech Transmission Index (STI); Leerraum und Raum mit Akustikmaßnahmen jeweils mit Möblierung.

### Faktor 3 nach DIN 18041

Die DIN 18041:2016-03 stellt in Anhang A.2 (normativ) die Bedingung eines näherungsweise diffusen Schallfeldes für die Berechnung nach DIN EN 12354-6:2004-04. Das kann für Räume mit gleichmäßig verteilter Absorption gelten. Dazu heißt es: „...die schallabsorbierenden Flächen sollen auf alle drei Raumdimensionen verteilt sein, d.h. der mittlere Schallabsorptionsgrad für die Flächen in den drei Raumdimensionen soll nicht mehr als um den Faktor 3 abweichen, insbesondere wenn keine schallstreuenden Objekte oder Oberflächen vorhanden sind.“ Faktor 3 bedeutet, dass das Verhältnis nicht größer als 3 oder nicht kleiner als 0,33 sein sollte.

Im vorliegenden Musterraum wurde dieses Verhältnis gebildet, indem auf die Absorption in z-Richtung Bezug genommen wird. Dies ist in Tabelle 1 dargestellt ( $0,33 < \text{Faktor} < 3$ ):

Tabelle 1: Faktorverhältnis nach DIN 18041 Anhang A.2.

Akustikdecke	Wandabsorber	Faktor Az	Faktor Ax	Faktor Ay
$\alpha_w = 1,0$	nein	1	0,19	0,13
$\alpha_w = 1,0$	ja	1	0,47	0,81
$\alpha_w = 0,7$	nein	1	0,23	0,16
$\alpha_w = 0,7$	ja	1	0,61	1,01

Tabelle 1 verdeutlicht, dass es bei Einbau einer Akustikdecke, gleich ob  $\alpha_w = 1,0$  oder  $0,7$ , zwingend erforderlich ist, eine ausreichende Anzahl von Wandabsorbern in den Raum einzubringen. Wie die Messungen mit den Absorbern auf „Ohrhöhe“ gezeigt haben, spielt auch die Positionierung der Wandabsorber eine Rolle. Ferner zeigt die Faktorrechnung, dass eine Akustikdecke mit

etwas geringerer Absorption (z.B.  $\alpha_w = 0,7$ ) eine gleichmäßigere und damit günstigere Verteilung der äquivalenten Absorptionsfläche ermöglicht.

## Besetzungszustand

Nach [1] soll der Besetzungszustand des Raumes berücksichtigt werden. In dieser Untersuchung wurde bei den meisten Berechnungen davon Abstand genommen, da ein Raum unserer Meinung nach ungeachtet variabler Faktoren wie Jahreszeit (Absorption durch Kleidung), Klassenstärke bzw. Krankenstand (Absorption und Schallstreuung durch Personenanzahl) und Schülergröße (Schallstreuung) akustisch funktionieren sollte.

Personen im Raum wirken schallstreuend und erhöhen die äquivalente Absorptionsfläche. Eine Messung mit 14 erwachsenen Personen (Besetzungszustand  $\sim 50\%$ ) und Ausstattung mit der A-Akustikdecke zeigte, dass sich mit Personen die längere Nachhallzeit bei 500 Hz deutlich vermindert. Die Nachhallzeit nähert sich ab 1000 Hz der Prognose nach Sabine an, unterhalb dieser Frequenz bleibt jedoch ein deutlicher Unterschied zur Berechnung. In diesem Frequenzbereich wird der Toleranzbereich für Inklusion nicht erreicht (vgl. Abb. 10). Größere Einrichtungsgegenstände wie z.B. Schränke oder Sideboards können hierbei zu einer weiteren Reduzierung der Nachhallzeiten bei mittleren und tiefen Frequenzen führen.

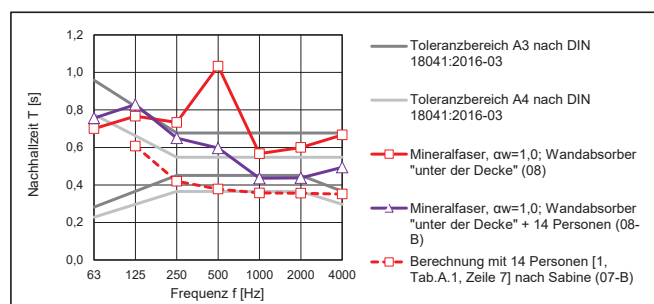


Abbildung 10: Einfluss der Besetzung mit 14 Personen auf die Nachhallzeit.

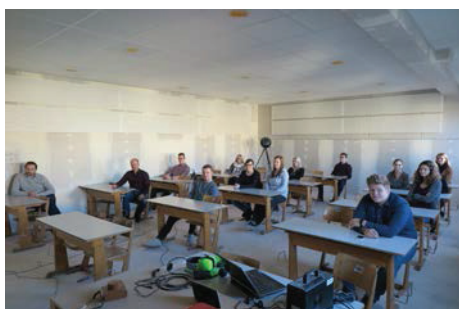


Abbildung 11: 50 % Belegungsdichte mit 14 Personen im Testraum.

## Fazit

Zu einer guten Akustik in einem üblichen Klassenraum mit Frontalunterricht gehören: Die Decke teilweise oder vollflächig mit einer schallabsorbierenden Decke auszustatten, sowie die Wände teilweise mit Absorbieren zu

belegen, möglichst in beiden Raumrichtungen gleichverteilt und auf „Ohrhöhe“ angebracht. In [1] finden sich hierzu Beispiele. Dabei spielt es weniger eine Rolle, ob eine Akustikdecke mit einem  $\alpha_w = 1,00$  oder  $0,7$  eingesetzt wird. Die Faktor 3-Regel aus DIN 18041 sollte bei der Verteilung der äquivalenten Absorptionsflächen auf die drei Raumdimensionen berücksichtigt werden. Es genügt nicht eine Akustik-Unterdecke einzubauen, es muss auch durch weitere Wandabsorber und/oder diffus streuende Einbauten sichergestellt werden, dass diese so wirksam sein kann wie in der Berechnung nach Sabine prognostiziert.

Menschen mit Höreinschränkungen brauchen aus akustischer Sicht besondere Aufmerksamkeit. Dabei ist es wichtig, sie in das Direktschallfeld der Sprecherin bzw. des Sprechers, also in Schulklassen nach vorne, zu setzen. Darüber hinaus sollte das Gesicht der sprechenden Person gut zu erkennen sein. Dafür kann es nötig sein, für zusätzliche Beleuchtung zu sorgen, damit es leichter fällt die Mimik zu erkennen und die Worte von den Lippen abzusehen.

Klassenzimmer bedürfen in jedem Fall geeigneter Akustikmaßnahmen, welche die Nachhallzeit über den Frequenzbereich von 63 Hz – 4000 Hz auf ein Maß von ca. 0,5 s – 0,6 s einstellen. Wichtiger als die Nachhallzeit rechnerisch für gegebene Toleranzgrenzen mit nur einem Bauteil mit hohem Schallabsorptionsgrad nachzuweisen, sind jedoch sowohl der sinnvolle Einsatz von Akustikmaßnahmen, als auch ein Bewusstsein für Schallstreuung, Diffusität und Absorberverteilung.

Ob noch geringere Nachhallzeiten, wie in der DIN 18041 für Inklusion vorgeschlagen, tatsächlich eine Verbesserung für Menschen mit einer Hörschädigung oder Fremdsprachler darstellen, muss wissenschaftlich untersucht werden. Auch die notwendige Sprechanstrengung der Lehrer in Räumen mit kurzer Nachhallzeit sollte dabei berücksichtigt werden.

## Literatur

- [1] DIN 18041:2016-03 Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung, Beuth Verlag
- [2] DIN EN ISO 3382-2:2008-09, Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik-Teil 2, Beuth Verlag
- [3] DIN EN ISO 11654:1997-07 Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden, Bewertung der Schallabsorption, Beuth Verlag
- [4] DIN EN ISO 354:2003-12 Messung der Schallabsorption in Hallräumen, Beuth Verlag
- [5] Sabine, W. C.: Collected Papers on Acoustics, Harvard University Press, 1922
- [6] Späh, M.; Hengst, K.; Xiaoru, Z.: Klassenraumakustik und Absorberverteilung – Messungen und Berechnungen, DAGA 2018, München
- [7] Hengst, K.: Was sagen Hallraummessungen über Raumakustik aus, Bauphysikertreffen 2017 HfT Stuttgart, Tagungsband 154, ISBN 978-3-940670-64-9