

Klassenraumakustik und Absorberverteilung

Text **Klaudius Hengst, Moritz Späh, Xiaoru Zhou**
 Bilder, Grafiken und Tabelle **Knauf AG**

Zu einer guten Akustik in einem Klassenraum, in dem frontal unterrichtet wird, gehören: Ausstattung der Decke teilweise oder vollflächig mit einer schallabsorbierenden Decke und teilweise Belegung der Wände mit Absorbent, möglichst in beiden Raumrichtungen gleichverteilt und auf «Ohrhöhe» angebracht. Das ist das Fazit eines Forschungsprojekts.

Beim Bau eines Standard-Klassenzimmers steht der Planer vor der Herausforderung, die Nachhallzeiten so einzustellen, dass möglichst nicht nur die normalen Anforderungen nach DIN 18041:2016-03 ([1], zur verwendeten Fachliteratur siehe Seite 13), sondern darüber hinaus die für Inklusion erfüllt werden.

Inklusion bedeutet, allen Schülerinnen und Schülern den gleichen Zugang zur Bildung zu ermöglichen. In Bezug auf die Raumakustik betrifft das vor allem die Berücksichtigung von Personen mit einer Hörbehinderung.

Ermittlung der realen Nachhallzeit

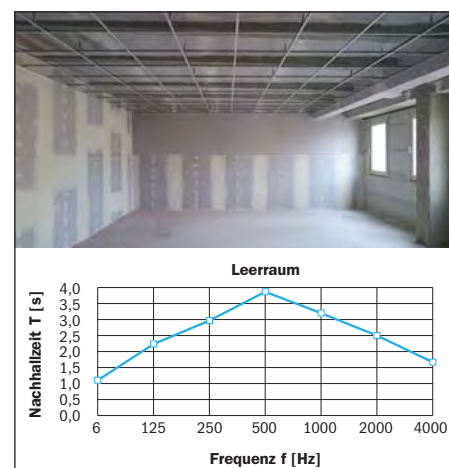
Bei Sanierungsfällen ist es in der Regel einfach möglich, die reale Nachhallzeit im Raum zu ermitteln. Im Rahmen von Neubaumassnahmen muss sich der Akustiker bei der Planung auf Annahmen und Berechnungen des zukünftigen Raumes verlassen.

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 man auch nicht davon ausgehen, dass durch das Einbringen von Mobiliar, Wandabsorbent und/oder Personen die äquivalente Absorptionsfläche im Raum näherungsweise gleichverteilt beziehungsweise das Schallfeld im Raum ausreichend diffus ist, um Prognosen zu rechtfertigen, wie sie im ideal diffusen Schallfeld zutreffen.

Abb.1: Leerer Klassenraum mit Unterkonstruktion einer Rasterdecke, Blick auf die Rückwand. Die Grafik zeigt die gemessene Nachhallzeit im leeren Raum.



Die Autoren: Dipl. Ing. (FH) Klaudius Hengst arbeitet bei der Knauf Gips KG in Iphofen (D). Dr. Moritz Späh ist Gruppenleiter Raumakustik Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP in Stuttgart (D), an dem auch Dipl.-Phys. Xiaoru Zhou forscht. Dieser Artikel bezieht sich auf den Fachbericht «Klassenraumakustik und Absorberverteilung – Messungen», der 2018 anlässlich der deutschen Jahrestagung für Akustik (DAGA) in München (D) publiziert wurde.

In einem umfangreichen Projekt untersuchte Knauf zusammen mit dem Fraunhofer IBP Stuttgart (D) am Beispiel eines Klassenzimmers die Konsequenzen, die sich aus Prognosen ergeben, wenn man die Annahme eines ideal diffusen Schallfelds mit einem real existierenden Schallfeld vergleicht.

Hierbei führten die Autoren dieses Artikels Messungen in einem eigens dafür gebauten Musterraum mit Akustikdecken der Absorberklassen A

In der Realität ist das Schallfeld der wenigsten Räume so diffus wie das in einem Hallraum.

und C (bewerteter Absorptionsgrad $\alpha_w = 1,00$ und $0,70$), mit und ohne Wandabsorber sowie mit und ohne Möblierung durch. Die Messungen verglichen sie mit unterschiedlichen Berechnungsverfahren [6].

Projekt Klassenzimmerakustik

Zur Untersuchung verschiedener Absorbervarianten wurde ein Musterklassenraum mit den Abmessungen $10\text{ m} \times 6,9\text{ m} \times 3,1\text{ m}$ ($L \times B \times H$) errichtet (vgl. Abb. 1). Die Betondecke des Gebäudes ist zwischen den Trägern mit Gipskartonplatten abgehängt. Drei Wände beste-

hen aus zweilagig beplankten Gipskarton-Ständerwänden, die Fassade aus einer gedämmten Leichtmetallkonstruktion mit Fenstern. Der Boden ist aus Beton.

Die 625-mm-Rasterdecke ist 250 mm von der Rohdecke abgehängt, so dass sich eine lichte Raumhöhe von 2,85 m und ein Raumvolumen von zirka 200 m^3 ergeben.

Materialien, Messtechnik/-positionen

Als Akustikkassettendecken kam zum einen ein Produkt aus 40 mm Mineralfaser (MF, $\alpha_w = 1,0$) zum Einsatz, zum anderen eine gelochte Gipskartonkassette (GK, LFA 10,5%) mit 50 mm Mineralwollehinterlegung ($\alpha_w = 0,7$). Die Wandabsorber (Länge $0,45\text{ m} \times$ Breite $2,4\text{ m} \times$ Höhe 55 mm) bestehen ebenfalls aus gelochtem Gipskarton, hinterlegt mit 30 mm Mineralwolle.

Die im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003-12 [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.

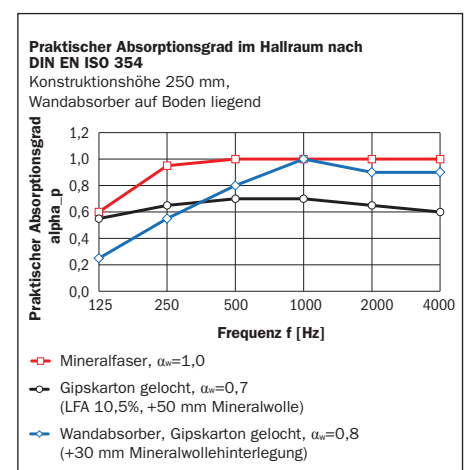
Die Bestimmung der Nachhallzeit erfolgte nach DIN EN ISO 3382-2:2008-09 [2]. Es wurden Messungen aus jeweils 21 Lautsprecher-Mikrofon-Kombinationen gemittelt und die Nachhallzeiten T30 ausgewertet. Die Mikrofonhöhen waren an die Hörerpositionen angepasst

und betrug 1,2 m bzw. 1,6 m. Die genauen Messpositionen finden sich in [7].

Absorption, Schallstreuung, 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 einerseits die Frage, wie diffus das Schallfeld im akustisch zu konditionierende Raum ist beziehungsweise nach der Einbringung der Akustikmassnahme wird und andererseits in welchem Masse Produkte die im Hallraum (DIN EN ISO 354:2003-12 [4]) gemessene Schallabsorption in einem nicht ideal diffusen Schallfeld er-

Abb. 2: Im Hallraum gemessene praktische Absorptionsgrade $\alpha_{p,P}$ der eingesetzten Akustikdecken und Wandabsorber.



bringen? Die durchgezogenen Linien der Diagramme in den Abb. 3 bis 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, und zwar ohne zusätzliche Belegung mit Personen. In fast allen Diagrammen sind die Toleranzgrenzen für Räume der Nutzungsarten A3 und A4 (Klassenzimmer Inklusiv) entsprechend DIN 18041:2016-03 [1] eingezeichnet. Die Abb. 4 bis 7 zeigen systematisch den Einfluss von Mö-

blierung 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?

In Abb. 2 sind die Absorptionsgrade der Akustikprodukte dargestellt. Es fällt jedoch in allen Diagrammen auf,

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

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

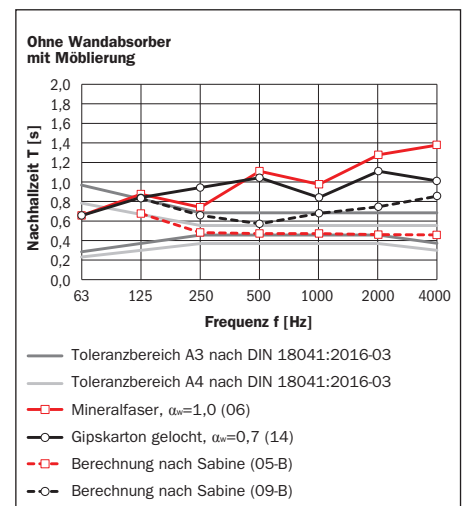
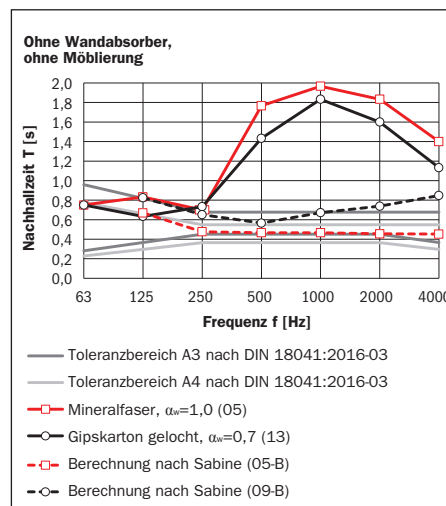
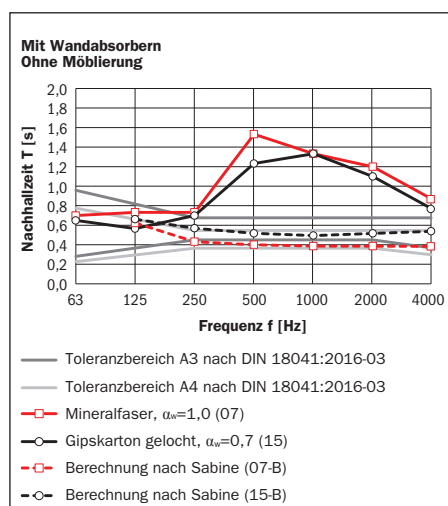


Abb. 8: Einfluss der Wandabsorberpositionierung auf die Nachhallzeit.

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.

Abb. 6: Raum mit MF- und GK-Akustikdecken, mit Wandabsorbern, ohne Möblierung (Abb. 3 C).

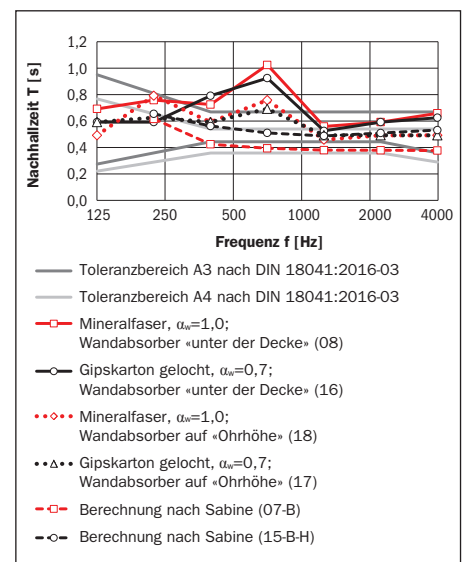
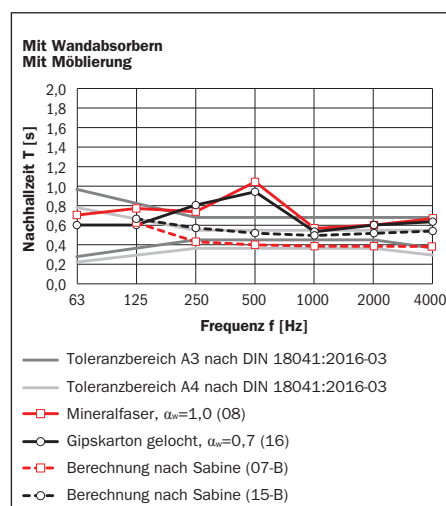


Das Einbringen von Wandabsorbern verbessert die akustische Situation durch die hinzukommenden schallstreuenden Eigenschaften mindestens genauso wie die zusätzliche äquivalente Absorptionsfläche (vgl. Abb. 6/7). Für den Raum mit C-Akustikdecke liegt die Nachhallzeit näher bei den Prognosewerten als im 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 Nachhall-

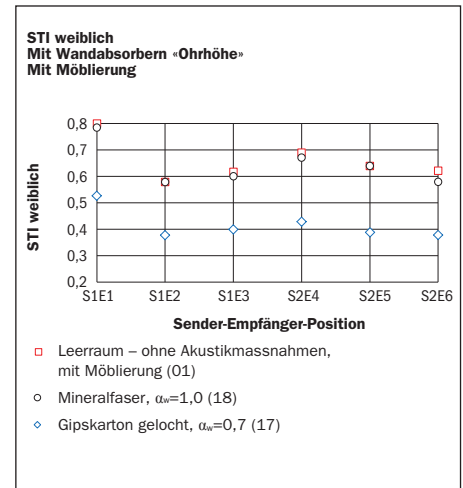
Abb. 7: Raum mit MF- und GK-Akustikdecken, mit Wandabsorbern, mit Möblierung (Abb. 3 D).



zeit signifikant, wenn die Wandabsorber auf «Ohrhöhe» (entspricht Mikrofonhöhe) angebracht sind. 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 gestrichelten die nach Sabine berechneten Nachhallzeiten. Der Unterschied zwischen durchgezogener und gepunkteter Linie ist einzig die Höhe, in der die Wandabsorber montiert waren (vgl. Abb. 3 D). Die Ursache für die längere Nachhallzeit bei 500 Hz ist vermutlich die unzureichende Diffusität

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



des Schallfelds im Raum. Die Messungen mit Wandabsorbem 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 $\alpha_w = 1,0$ oder $0,7$ ver-

baut 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 (vgl. z.B. 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.

Faktor 3 nach DIN 18041

Die DIN 18041:2016-03 [1] 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 gel-

Abb. 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 Wandabsorbem «unter der Decke», D: Raum mit Akustikdecke mit Möblierung, mit Wandabsorbem auf «Ohrhöhe» (entspricht Mikrofonhöhen innerhalb der Ober- und Unterkante der Wandabsorber).



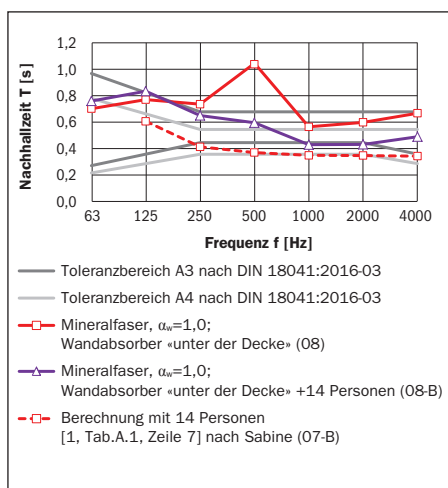


Abb. 10: Einfluss der Besetzung mit 14 Personen auf die Nachhallzeit.

ten. 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 ge-

nommen wird. Dies ist in der Tabelle auf Seite 13 dargestellt ($0,33 < \text{Faktor} > 3$). Die Tabelle 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 gleichmässiger und damit günstigere Verteilung der äquivalenten Absorptionsfläche ermöglicht.

Besetzungszustand

Nach DIN 18041:2016-03 [1] soll der Besetzungszustand des Raumes be-

rücksichtigt werden. In dieser Untersuchung haben die Autoren bei den meisten Berechnungen davon Abstand genommen, da ein Raum ihrer Meinung nach ungeachtet variabler Faktoren wie Jahreszeit (Absorption durch Kleidung), Klassenstärke beziehungsweise 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 Schränke oder Sideboards können zu einer weiteren Reduzierung der Nachhallzeiten bei mittleren und tiefen Frequenzen führen.

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 Absorbern zu belegen, möglichst

Abb. 11: 50 Prozent

Belegungsdichte mit 14 Personen im Testraum, inklusive Fotograf.



in beiden Raumrichtungen gleichverteilt und auf «Ohrhöhe» angebracht. In DIN 18041:2016-03 [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/ des Sprechers, also in Schulklassen nach vorne, zu setzen. Darüber hinaus sollte das Gesicht der sprechenden Person gut erkennbar sein. Dafür kann es nötig sein, für zu-

sätzliche 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 bis 4000 Hz auf ein Mass von zirka 0,5 s bis 0,6 s einstellen. Der sinnvolle Einsatz von Akustikmassnahmen und ein Bewusstsein für Schallstreuung, Diffusität und Absorberverteilung sind wichtiger, als der rechnerische Nachweis der Nachhallzeit für gegebene Toleranzgrenzen mit nur einem Bauteil mit hohem Schallabsorptionsgrad.

Ob noch geringere Nachhallzeiten, wie in der DIN 18041:2016-03 für Inklusion vorgeschlagen, tatsächlich eine Verbesserung für Menschen mit einer Hörschädigung oder Fremdsprachler darstellen, ist wissenschaftlich zu untersuchen. 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.

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