

Raumakustik

Akustische Gestaltung von Klassenzimmern

Dr.-Ing. Jürgen H. Maue

In Unterrichtsräumen kommt es vielfach zu hohen Geräuschpegeln, die von Lehrern wie auch von Schülern in starkem Maße als störend und belästigend empfunden werden. Insbesondere in akustisch ungünstig gestalteten Räumen haben die Schüler Probleme mit der Sprachverständlichkeit, so dass sie dem Unterricht nur unter großen Anstrengungen oder nur teilweise folgen können. Das führt zu einer schnellen Ermüdung und Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit. Aufgrund verschiedener Studien kann man von einer Verschlechterung der Gedächtnisleistungen von mehr als 20% ausgehen [1, 2].

Für das Lehrpersonal können sich bei hohen Geräuschbelastungen im Unterricht Stressreaktionen ergeben, die sich z.B. anhand der Herzschlagfrequenz nachweisen lassen [3]. Ein akustisch ungünstiges Klassenzimmer bedeutet für den Lehrer aber auch eine deutlich stärkere Belastung seiner Stimme, möglicherweise mit der Folge von gesundheitlichen Problemen.

In diesem Beitrag werden die Anforderungen an die Akustik in Klassenzimmern und die danach zu empfehlenden Maßnahmen beschrieben. Als Hilfe für die akustische Auslegung von Klassenzimmern wird ein

neuer „Raumakustik-Rechner“ zur Berechnung von Nachhallzeiten vorgestellt, der auf der Internetseite des Instituts für Arbeitsschutz (IFA) zum Herunterladen angeboten wird. Außerdem werden zwei Beispiele für erfolgreich nachgebasterte Klassenzimmer gezeigt. Die raumakustischen Maßnahmen waren ein Teil eines umfassenden Projektes „Gesundheits- und lernförderndes Klassenzimmer“ der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV), in dem auch andere Faktoren, wie z.B. Möblierung, Belüftung und Beleuchtung, untersucht und optimiert wurden.

Allgemeine Grundlagen der Klassenraumakustik

Die Geräuschbelastung in Klassenzimmern entsteht vor allem durch die Sprache des Lehrpersonals und der Schüler. Dabei ist die Sprache in der Regel das Nutzsignal, das nach Möglichkeit an allen Plätzen gut verständlich ankommen soll. Überlagert wird die Sprache vielfach durch ein schwankendes Störsignal, das zum Beispiel durch Flüstern, Stühle rücken oder von außen eindringende Geräusche verursacht wird.

Um die Sprache gut verstehen zu können, verlangt man im Allgemeinen ein Nutzsignal, das um mindestens 10 dB(A) über dem Störsignal liegt (Signal-Rausch-Abstand 10 dB). Erwachsene können dabei die störenden Hintergrundgeräusche relativ gut ausblenden und unvollständige akustische Informationen im Geiste ergänzen. Kinder sind dazu jedoch weniger in der Lage und werden durch die Störgeräusche viel stärker beeinträchtigt als Erwachsene [1, 4, 5]. Deshalb benötigen Kinder für eine fehlerfreie Verständigung einen Nutzsignalpegel, der rund 15 dB(A) über dem Störgeräusch liegt. Das gilt insbesondere für Nicht-Muttersprachler sowie für das Erlernen einer Fremdsprache. Wenn man davon ausgeht, dass die Stim-

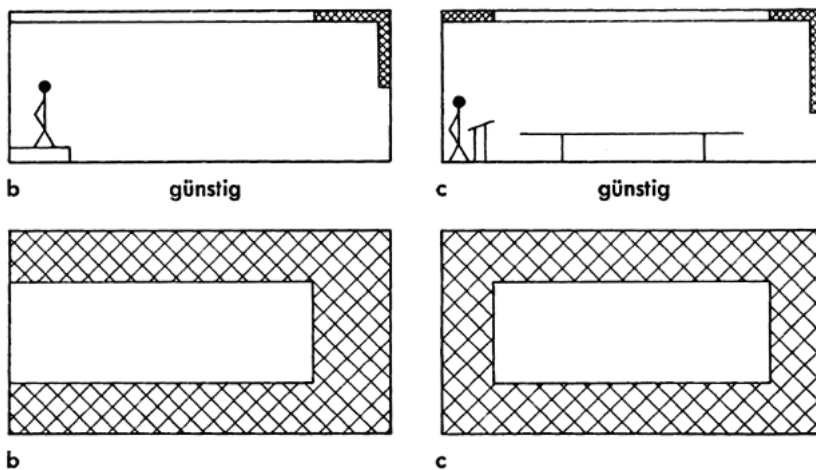


Bild 1: Verteilung von Schallabsorptionsflächen (schraffierte Flächen) in Unterrichts- und Sitzungsräumen, jeweils im Aufriss und als Deckenuntersicht (Quelle: DIN 18041).

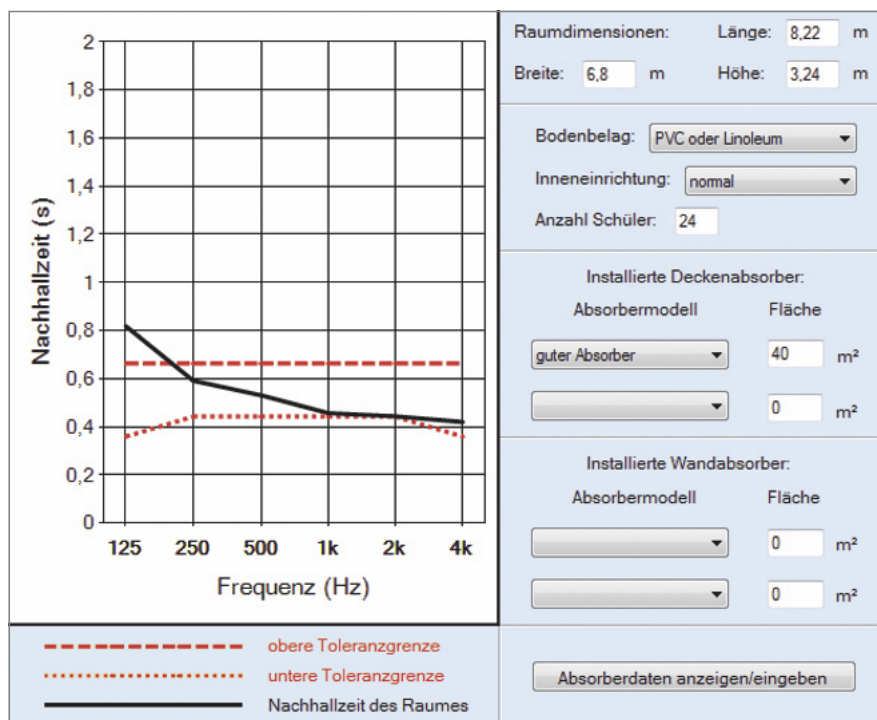


Bild 2: Eingabemaske für den Raumakustik-Rechner (Förster/IFA).

me eines Erwachsenen beim normalen Sprechen einen Schalldruckpegel von 50 bis 55 dB(A) erzeugt, sollte der Störgeräuschpegel also möglichst nur 35 bis 40 dB(A) betragen. Tatsächlich liegt der Störgeräuschpegel beim Unterricht jedoch meist eher bei 50 dB(A), so dass der Lehrer gezwungen ist, mit erhobener Stimme zu sprechen, wenn er von allen Schülern verstanden werden will. Dazu kommt noch das Problem, dass der Schallpegel der Stimme über die Entfernung abnimmt und in der letzten Reihe – vielleicht in 8 m Entfernung – deutlich leiser ankommt, während das Störgeräusch hinten mindestens ebenso hoch ausfällt wie vorne in der Klasse.

Für die Sprachverständlichkeit ist neben dem Störgeräusch bzw. Hintergrundgeräusch vor allem die Nachhallzeit von Bedeutung [4, 6]. Dabei können so genannte „frühe Schallreflexionen“, die innerhalb von 50 ms nach dem Direktschall auf den Empfänger treffen, durchaus zum guten Verstehen der Sprache beitragen [3, 7, 8]. Unter Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit in der Luft von ca. 340 m/s kann man sich ausrechnen, dass der geometrische Umweg des reflektierten Schalls über die Decke oder Wände im Vergleich zum direkten Weg des Schalls nicht mehr als 17 m betragen darf. Die da-

rauf folgenden mehrfach reflektierten Schallwellen (Nachhall) tragen dazu bei, dass die in der Sprache enthaltenen Informationen verschliffen werden und die Verständlichkeit leidet. Deshalb ist es ganz entscheidend für die akustische Qualität von Klassenzimmern, die Mehrfachreflexionen des Schalls an den Raumbegrenzungsflächen zu vermeiden und die Nachhallzeiten zu begrenzen. In größeren Räumen kann sich der Schall zwischen zwei parallelen Wandflächen mehrfach periodisch reflektieren, so dass ein „schnarrender“ Klangeindruck entsteht. Man spricht dann von Flatterechos.

Die Halligkeit führt in einem Klassenzimmer dazu, dass die Lehrkraft lauter spricht, um die Schüler besser zu erreichen. Aber auch die Schüler verhalten sich in halligen Räumen lauter. Insbesondere bei Gruppenarbeiten wird lauter gesprochen, um sich verständlich zu machen. Die daraus resultierende Unruhe und der höhere Grundgeräuschpegel führen wiederum dazu, dass noch lauter gesprochen wird und sich die Geräuschbelastung weiter erhöht (Lombard-Effekt). Der Schalldruckpegel schraubt sich dadurch immer weiter in die Höhe und führt letztlich zu einer für alle betroffenen Personen extrem unangenehmen Geräuschbelastungssituation.

Durch geeignete akustische Maßnahmen

lässt sich die Situation jedoch wesentlich entschärfen. So lassen sich die pegelerhöhenden Schallreflexionen durch eine schallabsorbierende Gestaltung von Raumbegrenzungsflächen deutlich verringern und zugleich eine wesentliche Verbesserung der Sprachverständlichkeit erreichen. Dadurch kann wieder leiser gesprochen werden und das oben beschriebene gegenseitige Aufschaukeln der verschiedenen Geräusche wird vermieden.

Maßnahmen

Eine wesentliche Grundlage für die akustische Gestaltung von Klassenzimmern ist die im Jahre 2004 überarbeitete Norm DIN 18041 [9]. Danach sollten Klassenzimmer in der üblichen Größe von ca. 250 m³ Nachhallzeiten im Bereich von 0,4 bis 0,6 s aufweisen (s. auch [8]). Verschiedene Studien empfehlen für Grundschulen und Vorschulen noch geringere Nachhallzeiten von ca. 0,3 s [10].

In der Regel lassen sich die genannten Zielvorgaben allein durch eine schallabsorbierende Gestaltung der Deckenfläche mit einem zu 50 bis 60 % schallabsorbierenden Material erreichen [4, 6, 11]. Dazu eignen sich z.B. ca. 20 mm dicke schallabsorbierende Mineralfaserplatten, wenn sie in mindestens 10 cm Abstand zur Decke montiert werden (z.B. mit Hilfe eines Schienenrasters). Bei Verwendung eines Materials, das bei mittleren und hohen Frequenzen eine hohe Schallabsorption aufweist, sollte dieses entsprechend Bild 1 nur an den Rändern der Decke angeordnet werden, um die für die Sprachverständlichkeit bedeutenden hochfrequenten Schallanteile (Konsonanten) auch in den hinteren Teil der Klasse zu übertragen. Der mittlere Teil sollte dabei die mittleren und hohen Frequenzen ausreichend reflektieren, kann aber zur Absorption tiefer Frequenzen als Plattenschwinger ausgeführt werden [7]. Um eine optisch einheitliche Deckenansicht zu erreichen, kann man z. B. eine gelochte oder geschlitzte Abdeckung des absorbierenden Materials wählen und im mittleren Bereich des Raumes reflektierende Platten hinterlegen.

Wenn die Maßnahmen in Eigenleistung (Selbsthilfe-Aktion) realisiert werden sol-

len, bieten sich vor allem Schaumstoffmaterialien an (Melaminharz-Schaumplatten, schwer entflammbar, mindestens Brandschutzklasse B1), die sich relativ leicht zuschneiden und mit handelsüblichen Klebern einfach an die Decke kleben lassen [11]. Gardinen, Teppiche und gepolsterte Möbel wirken ebenfalls als poröse Absorber, allerdings vor allem bei hohen Frequenzen, so dass sich entsprechende Maßnahmen ungünstig auf die Sprachverständlichkeit auswirken können.

Ergänzend zu der schallabsorbierenden Decke kann eine schallabsorbierende Bele-

gung des oberen Teiles der Rückwand des Raumes sinnvoll sein [8, 9], da der über die Decke und die Rückwand reflektierte Schall in den vorderen Reihen ggf. mit einer zu großen Verzögerung gegenüber dem direkten Schall eintrifft (mehr als 17 m Weg) und die Verständlichkeit für Sprache dadurch verschlechtert. Darüber hinaus gibt es Empfehlungen zur Realisierung von Plattenabsorbern bzw. Breitband-Kompaktabsorbern, die an den Wandflächen oder in den Raumkanten angeordnet werden sollten und insbesondere die tiefen Frequenzen absorbieren [11, 12].

Die Wand hinter dem Lehrer sollte dagegen reflektierend sein, um den Direktschall unterstützende frühe Reflexionen zu gewährleisten.

Raumakustikrechner für Klassenzimmer

Um die Raumakustik von Klassenzimmern auf einfache Weise prüfen zu können und geeignete Verbesserungsmaßnahmen zu entwickeln, wurde ein Rechenprogramm erstellt, mit dem sich die Nachhallzeiten berechnen und mit den entsprechenden Vorgaben nach DIN 18041 vergleichen lassen (www.dguv.de, Webcode d130076). **Bild 2** zeigt die Eingabemaske für das Programm.

Zur Berechnung der Nachhallzeiten für ein Klassenzimmer müssen die Abmessungen des Raumes, die Art der Begrenzungsflächen, die Inneneinrichtung und die Anzahl Schüler eingegeben werden. Falls der Raum bereits eine schallabsorbierende Decke oder entsprechende Wandflächen aufweist, sind für diese Flächen die Größen und Schallabsorptionseigenschaften einzugeben. Bei der Schallabsorption kann man zwischen drei vordefinierten Schallabsorbern unterschiedlicher Qualität („schlecht“, „mittel“ und „gut“) auswählen. Falls das verwendete Material bekannt ist, kann man aber auch die vom Hersteller dafür angegebenen Absorptionsgrade eingeben. Das gilt z.B. auch für die Planung einer Nachbesserung mit bestimmten Materialien. Die Eigenschaften der vordefinierten Schallabsorber wie auch der selbst eingegebenen Schallabsorber sind in einer Tabelle einsehbar, die sich um weitere Materialien erweitern lässt.

Nach der Eingabe der erforderlichen Daten werden die für den Raum berechneten Nachhallzeiten in den Oktavbändern von 125 Hz bis 4000 Hz dargestellt, wie es das Beispiel in **Bild 2** zeigt. Zugleich werden die nach DIN 18041 empfohlenen Toleranzgrenzen für die Nachhallzeiten angegeben. Damit sollten sich die Nachhallzeiten für ein bestehendes Klassenzimmer relativ einfach berechnen und ggf. erforderliche Maßnahmen zur Verbesserung der Raumakustik gezielt planen lassen.



Bild 3: Klassenzimmer der Grundschule in Sachsen im ursprünglichen Zustand (Quelle: IAG/Dresden).



Bild 4: Klassenzimmer der Grundschule in Sachsen nach Umbaumaßnahmen (Quelle: IAG/Dresden, Floß).

Beispiele für erfolgreiche akustische Nachbesserung von Klassenzimmern

Im Rahmen eines von der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) durchgeführten Projektes „Gesundheits- und lernförderndes Klassenzimmer“ wurden zwei Klassenzimmer hinsichtlich ihrer ergonomischen Gestaltung untersucht und optimiert. Dabei ging es neben der hier behandelten akustischen Gestaltung z. B. auch um die Möblierung, Belüftung, Beleuchtung und Farbgestaltung des Klassenzimmers. Während in der dabei betrachteten Hauptschule in Nordrhein-Westfalen aufgrund einer abgehängten Decke mit 30 mm dickem Absorptionsmaterial (hinter Holzpaneelen) bereits eine relativ günstige raumakustische Situation vorgefunden wurde, gab es in der untersuchten Grundschule in Sachsen eine ausgesprochen ungünstige Situation. Ursache waren die dort gegebenen allseitig schallharten Begrenzungsflächen, insbesondere die Deckenfläche aus Beton. Der Grundgeräuschpegel fiel in beiden Räumen mit Werten im Bereich von 35 dB(A) bei geschlossenen Fenstern relativ niedrig aus, so dass keine Maßnahmen zur Verringerung der Geräuscheinstrahlung von außen notwendig waren.



Bild 6: Klassenzimmer der Hauptschule in Nordrhein-Westfalen mit schallabsorbierenden Flächen in Form der Holz-Paneel-Decke und Rückwand.

Für das Klassenzimmer in Sachsen wurden bei mittleren Frequenzen um 500 Hz Nachhallzeiten von ca. 1,1 s gemessen (Messungen durch IAG/Dresden). Entsprechend den Vorgaben der DIN 18041 sollte die Nachhallzeit bei dem gegebenen Raumvolumen von ca. 152 m³ mit 0,53 s nur etwa halb so groß sein. Aufgrund der Empfehlungen des IFA wurde der Raum mit einer abgehängten Schall absorbierenden Decke aus ca. 40 mm dickem Mineralfasermaterial nachgerüstet. Das Material

wies bei Frequenzen ab 250 Hz einen Schallabsorptionsgrad von mehr als 0,7 auf. Die **Bilder 3 und 4** zeigen das Klassenzimmer vor und nach dem Umbau.

Mit der relativ einfach zu realisierenden akustischen Nachbesserung ließen sich die Nachhallzeiten bei mittleren Frequenzen auf Werte von 0,3 bis 0,5 s reduzieren. In **Bild 5** sind die entsprechenden Nachhallzeiten vor und nach der Einbringung der schallabsorbierenden Decke gegenüber gestellt. Für den belegten Raum werden unter Berücksichtigung der durch 20 Schüler zu erwartenden Schallabsorption im gesamten betrachteten Frequenzbereich Nachhallzeiten von weniger als 0,4 s erreicht.

Obwohl der dadurch erreichte Erfolg nicht ohne weiteres als Schalldruckpegelminderung messbar ist, weil die Geräuschbelastung auch von dem jeweiligen Unterricht und dem Lehrpersonal abhängt, wurden vor und nach dem Umbau jeweils drei stichprobenartige Schallmessungen während des Unterrichts durchgeführt (Ermittlung der äquivalenten Dauerschallpegel über jeweils 30 min). Damit ließ sich im Mittel eine Pegelminderung um ca. 9 dB(A) von ca. 65 dB(A) auf 56 dB(A) feststellen. Das wäre auch mit den Ergebnissen von anderen Stellen in Einklang, die je nach Ausgangssituation Pegelminderungen von 5 bis 10 dB(A) angeben [3, 4, 6]. Darüber hinaus lässt sich für das neu ge-

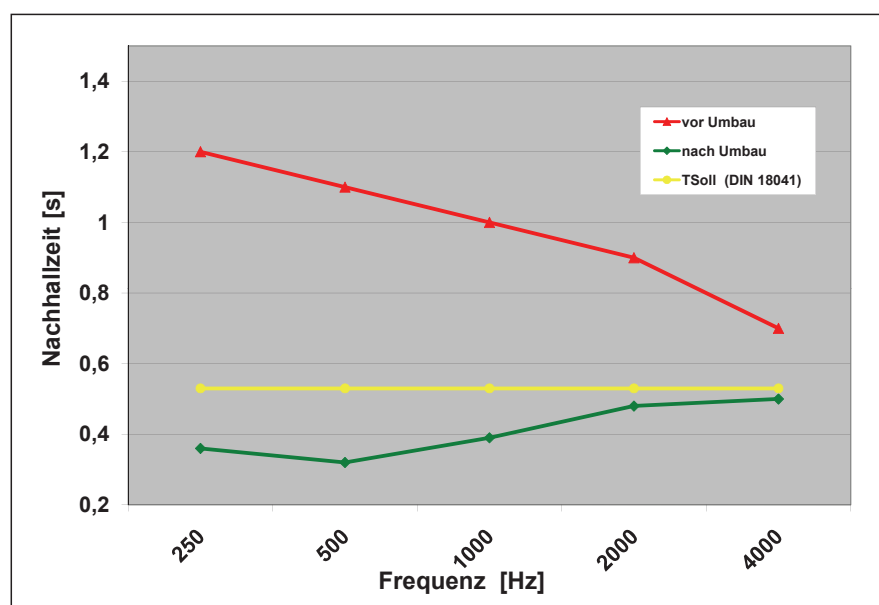


Bild 5: Nachhallzeiten für das Klassenzimmer (152 m³) in Sachsen vor und nach Einbau der schallabsorbierenden Decke.

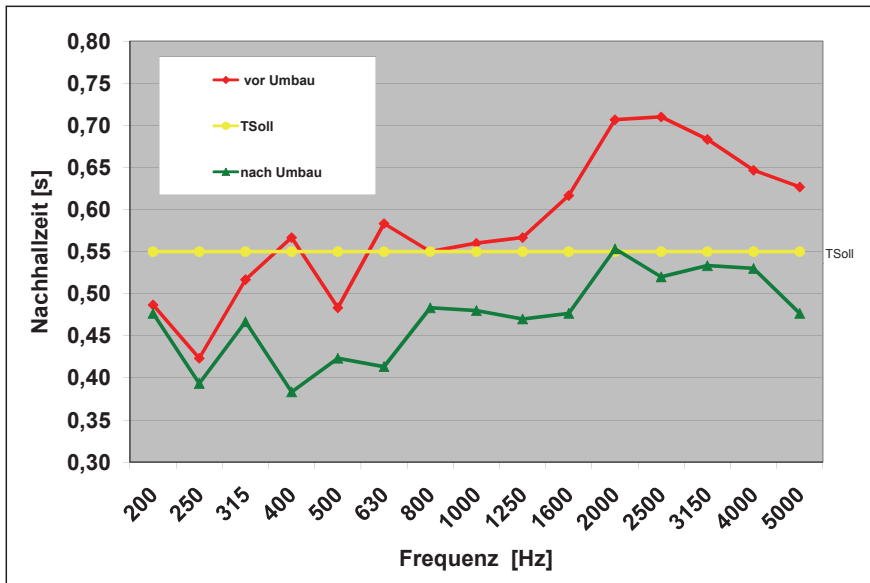


Bild 7: Nachhallzeiten für Klassenzimmer in Nordrhein-Westfalen vor und nach Einbringung der schallabsorbierenden Rückwand.

staltete Klassenzimmer auch subjektiv eine wesentliche Verbesserung der Sprachverständlichkeit feststellen.

Das zweite betrachtete Klassenzimmer in der Hauptschule in Nordrhein-Westfalen hatte ein Raumvolumen von ca. 180 m³ und sollte entsprechend DIN 18041 eine Nachhallzeit von ca. 0,55 s aufweisen. Da der Raum eine schallabsorbierende Decke aufwies, wurde diese Anforderung schon in der Ausgangssituation erfüllt. Um die raumakustische Situation noch etwas zu verbessern, wurde der obere Teil der Rückwand des Raumes auf ca. 8 m² mit einem schallabsorbierenden Material belegt (40 mm dickes Wall Panel). Bild 6 zeigt den Blick auf die Rückseite des neu gestalteten Raumes. Durch die zusätzlich eingebrachte Absorptionsfläche konnten die Nachhallzeiten noch ein wenig reduziert werden, wie die in Bild 7 dargestellten Ergebnisse erkennen lassen. Für mittlere Frequenzen ergab sich eine Reduzierung von ca. 0,55 s auf Werte von 0,4 bis 0,5 s. Für die mit Schülern belegte Klasse ergaben sich nahezu optimale Nachhallzeiten von ca. 0,4 s bei allen Frequenzen. Die Sprachverständlichkeit wurde vor und nach dem Umbau jeweils mit einem Sprachübertragungsindex STI von ca. 0,75 (gut bis ausgezeichnet) gemessen.

Schlussbemerkung

Welche Bedeutung die Raumakustik in Klassenzimmern für das Wohlbefinden und die Gesundheit des Lehrpersonals hat, ist vielen Schulträgern möglicherweise gar nicht bekannt. Auch für die Belastung der Schüler und deren Leistungsfähigkeit spielt die Geräuschsituation in der Klasse eine große Rolle. Dabei lassen sich die raumakustischen Verhältnisse in Klassenzimmern in der Regel mit wenig Aufwand deutlich verbessern, wie hier anhand von zwei Beispielen gezeigt werden konnte. Die nach DIN 18041 geforderten Nachhallzeiten sind allein durch eine schallabsorbierende Deckengestaltung zu erreichen. Diese relativ einfache Maßnahme führt zu einem deutlich reduzierten Geräuschpegel und einer auch subjektiv spürbaren Verbesserung der Sprachverständlichkeit.

Literatur

- [1] Klatte, M., Hellbrück, J.: Wirkungen von Hintergrundschall auf das Arbeitsgedächtnis. Z. Lärmbekämpfung 40 (1993), S. 91–98
- [2] Klatte, M., Sukowski, H., Meis, M., Schick, A.: Effects of irrelevant speech on speech perception and phonological short-term memory in children aged 6 to 7 years. Proceedings of the Joint Congress CFA/DAGA, Strasbourg 2004

- [3] Oberdörster, M., Tiesler, G.: Akustische Ergonomie der Schule. Schriftreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Fb 1071, Dortmund/Berlin/Dresden 2006
- [4] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie: Lärminderung in Schulen. Umwelt und Geologie, Lärmschutz in Hessen, Heft 4, 2. Auflage, Wiesbaden 2007
- [5] Neuman, A.C., Hochberg, I.: Children's perception of speech in reverberation. Journal of the Acoustical Society of America 72, 1983
- [6] Mac Kenzie D. J., Airey S.: Classroom acoustics. Summary Report 1999. Heriot-Watt University Edinburgh.
- [7] Fasold, W. und Veres, E.: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis – Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen. Verlag für Bauwesen, Berlin 1998
- [8] Mommertz, E.: Akustik und Schallschutz – Grundlagen, Planen, Beispiele. DETAIL Praxis. 1. Auflage, Aumüller Druck, Regensburg 2008
- [9] DIN 18041: Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen. (Mai 2004)
- [10] Schönwälder, H.-G., Berndt, J., Ströver, F., Tiesler, G.: Lärm in Bildungsstätten – Ursachen und Minderung. Schriftreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Fb 1030, Dortmund/Berlin/Dresden 2004
- [11] Rickes, O., Gemes, A., Helfmann, H.: Reduzierung der Lärmbelastung in Schulen durch Verbesserung der Raumakustik. Unfallkasse Hessen + Gewerkschaft Erziehung und Wissenschaft, April 2006
- [12] Fuchs, H. V.: Weniger Lärm in Kommunikations- und Schulungsräumen. Lärmbekämpfung 2 (2006) – November, S. 47–56

Autor

Dr.-Ing. Jürgen Maue
Referatsleiter „Lärm“, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)
E-Mail: Juergen.Maue@dguv.de