Erreicht DIN 18041-2016 ihr Ziel hinsichtlich Sprachverstehen, Schallbelastung und Lärmminderung in Unterrichts- und Kommunikationsräumen?

Helmut V. Fuchs[1], Gerhard Graber[2]

[1] *CASA ACUSTICA Berlin, E-Mail: hvfuchs@hotmail.com*
[2] *TU Graz, E-Mail: graber@tugraz.at*

Bei der Überarbeitung der DIN 18041-2016 [1] wurden die Anforderungen bezüglich der Nachhallzeiten durch Verschärfung im mittleren bei gleichzeitiger Lockerung im tieferen Frequenzbereich signifikant geändert. Nach drei Jahren lohnt daher eine Diskussion auf Basis aktueller wissenschaftlicher Forschungs- und praktischer Umsetzungsergebnisse bei Sprachverstehen und Lärmminderung. In Zeiten da Lehrermangel, krankheitsbedingter Unterrichtsausfall und Bildungsdefizite in den Fokus rücken, sollten sich Architekten und ihre Berater der Schuld unzureichender Raumakustik an dieser Entwicklung bewusst sein und die akustischen Verhältnisse in Ausbildungs-, Arbeits- und Freizeitbereichen nach heutigem Stand des Wissens und der Technik grundlegend verbessern. Dabei geht es in großen wie in kleineren Räumen darum, wie die stets notwendigen Schall lenkenden und schluckenden Maßnahmen Raum, Flächen und Kosten sparend in der Praxis zu realisieren sind. Am Beispiel zweier Hörsäle der TU Graz werden dazu zwei konkurrierende Konzepte vorgestellt: das eine konzentriert sich, wie viel zu oft, nur auf die Absorption mittlerer Frequenzen, das andere zielt dagegen auf gute Schalllenkung und eine möglichst konstante Nachhallcharakteristik im Raum.

1. Frühe Reflexionen in der Raumakustik

In allen akustisch anspruchsvollen Räumen spielt die Direktschall-Übertragung von den Quellen zu den Hörern bei genügendem Störabstand eine entscheidende Rolle für die Deutlichkeit von Sprache sowie die Klarheit von Musik. Starke laterale (Wand- und Decken-) Reflexionen, die mit gewissen Laufzeit-Differenzen Δt eintreffen, können differenziertes Hören bei mittleren und hohen Frequenzen dank des *Haas*-Effektes unterstützen, insbesondere bei entfernteren Hörern. Allerdings dauert es nach Cremer [2, dort § 35] etwa die dreifache Periodendauer eines Tones, um zunächst diesen im Direktschall zu erkennen und zu lokalisieren, bei 125 Hz also etwa 24 ms. Während dieser ´Kennzeit´ können etwa in mehrseitig besonders reflexionsarm ausgekleideten Studios an deren Regiefenstern oder generell in größeren Räumen nach [2, Teil 1] schädliche Wellen-Interferenzen nach Art des bekannten ´Kammfilter´- bzw. eines bisher weniger beachteten ´Mulm´- Phänomens auftreten. In einem kleineren Raum wie in Abb. 1 können sich z.B. die angedeuteten Reflexionen längs seiner Hauptachse mit $\Delta t \approx 4$ bis 20 ms und Pegel-Unterschieden $\Delta L \approx 7$ bis 1 dB für Frequenzen $f > 1$ kHz, also mit $\Delta t \cdot f \approx 4$ bis 20, sehr vorteilhaft energetisch addieren. Wenn in [1] absorbierende Verkleidungen nach Abb. 2 als ´günstig´ gelten und mit der löblichen Absicht einer gleichmäßigen Verteilung der Absorption im Raum noch zusätzliche Wand-Absorber empfohlen werden, dann kann man es, anders als dort behauptet, mit der Absorption bei höheren Frequenzen also auch übertreiben.

Bei tieferen Frequenzen (etwa $\leq$ 250 Hz) ist eine solche energetische Unterstützung des Direktschalls durch laterale Reflexionen nicht zu erreichen. Diejenigen in Abb. 1 können sich z.B. um 125 Hz herum mit $\Delta t \cdot f \approx 0{,}5$ bis 2,5 nicht positiv überlagern. In kleineren Räumen werden stattdessen durch diese, ebenso wie durch alle anderen Schallwellen (auch solche von Räuspern, Stuhlrücken und Außenlärm), stets sehr störende diskrete Raum-Resonanzen angeregt.

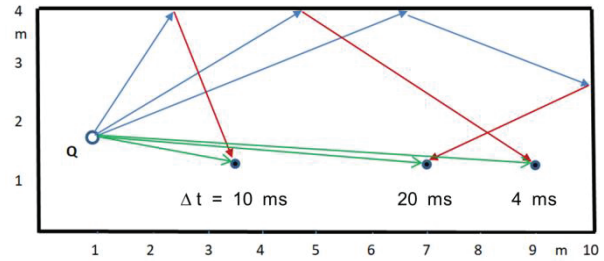

Abb. 1: Decken- und Mehrfach-Reflexionen (rot), die den Direktschall (grün) von einer Quelle Q nur bei mittleren und hohen Frequenzen energetisch unterstützen können

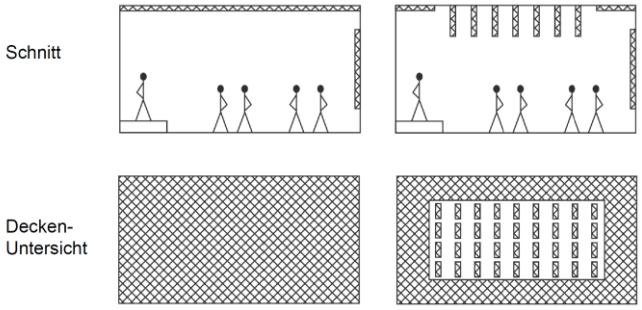

Abb. 2: In [1, dort Bild 4 c) und d)] als ´günstig´ empfohlene absorbierende Maßnahmen, die nützliche frühe Reflexionen bei hohen Frequenzen unterbinden, aber schädliche bei tiefen Frequenzen nicht absorbieren können

2. Probleme mit den Raum-Moden

Im Freifeld, also ohne jeden Raumeinfluss gemessene Spektren von Sprache gipfeln zwar bei den tiefen Frequenzen, aber für das Sprachverstehen ist der kHz-Bereich maßgeblich, s. Abb. 3. Man könnte also meinen, dass die ausgesprochen disharmonischen Raum-Resonanzen unterhalb der *Schröder*-Frequenz zwar mulmig-dumpf dröhnen, aber primär doch wohl der mittlere Frequenzbereich raumakustisch zu behandeln sei. Genau dies wird durch DIN 18041-2016 suggeriert (Abb. 4). Demnach wäre ein Bass-Verhältnis

$$BR = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1000}}$$

bis 1,6, wie es in schlecht behandelten Klassenzimmern oder Speiseräumen leider allzu oft anzutreffen ist, noch tolerabel. Den dann ungehindert tobenden Raum-Moden meint man in [1] u.a. durch geeignete Raumproportionen und schräg gestellte Wände entgegenwirken zu können. Diesen Vorstellungen wird in [3, Teil 2] mit ausführlicher Diskussion u.a. der Verdeckung hoher durch tiefe Frequenzen und der be-

sonders deutlich beim Sprechen unter Störgeräusch quantifizierbaren *Lombard*-Effekte widersprochen. Demnach eskaliert in Räumen, die durchaus dieser Norm entsprechen, bei jeder Kommunikation, auch jedem Ensemblespiel eine unsägliche ´Lautheitsspirale´, wenn dieser nicht durch eine Respektsperson (z.B. Lehrkraft oder Dirigent), äußerst anstrengend für alle Beteiligten, energisch Einhalt geboten wird.

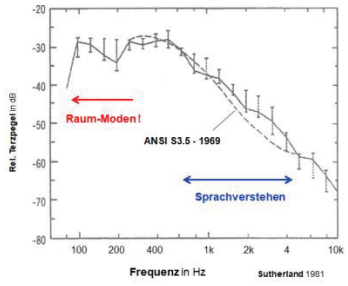

Abb. 3: Das Emissionsspektrum einer männlichen Stimme

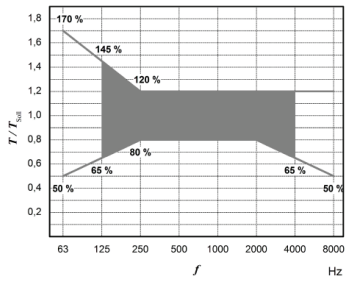

Abb. 4: Toleranzbereich der Nachhallzet T, bezogen auf einen Sollwert $T_{soll} = T_{500-1000\,Hz}$, nach [1, Bild 2]

3. Einfluss von Störgeräuschen und Nachhallzeit auf das Sprachverstehen

Hier werden zunächst einige ab 2014 publizierte psychoakustische Forschungsergebnisse zum Sprachverstehen bei verschiedenen Störgeräuschen in 6 fachgerecht gemäß Abb. 5 simulierten Unterrichtsräumen mit Abmessungen 8,4 x 7,7 x 3,9 m skizziert (ausführlicher in [3]): Das rechte Säulenpaket in Abb. 6 zeigt, noch ohne jedes Störgeräusch (KG), den erwarteten geringen Einfluss der akustischen Gestaltung der Räume.

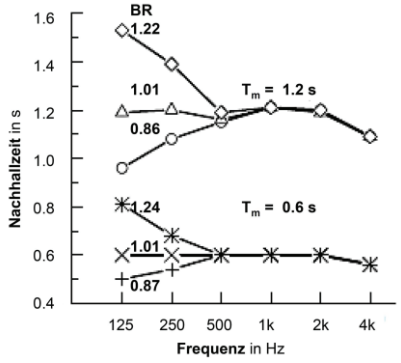

Abb. 5: Nachhallzeiten, wie sie sich aus der Impulsantwort von 6 simulierten Raum-Situationen 1.a (+), 1.b (x), 1.c (*), 2.a (o), 2.b (Δ), 2.c (◊) ergeben

Wenn ein tiefenbetontes Störsignal gemäß Abb. 7 zunächst mit großem Störabstand von SNR = 10 dB(A) überlagert wird (Paket TR 10 in Abb. 6), sinkt die binaural über Kopfhörer ermittelte Silbenverständlichkeit um bis zu 10 %. Bei einem um 10 dB(A) stärkeren Störsignal (TR 0) fällt die Verständlichkeit aber bis auf 60 % ab. Gleichzeitig wächst der durch die schwarzen Spangen angedeutete Streubereich erheblich an. Der Störeinfluss durch ´weißes Rauschen´ (WR 10 und WR 0 in Abb. 6) mit gleichem A-bewerteten Schalldruckpegel ist deutlich geringer als vom tiefenbetonten Rauschen (TR 0 und TR 10 in Abb. 6).

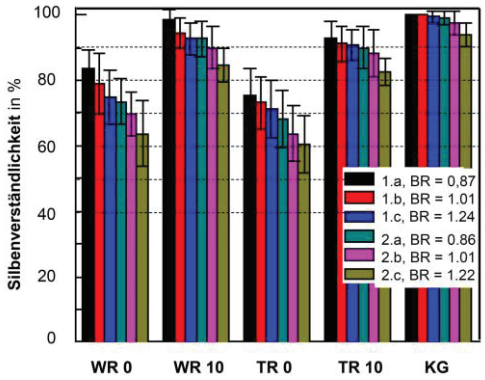

Abb. 6: Silbenverständlichkeit bei 32 Studenten in unterschiedlichen Raum- und Geräusch-Situationen

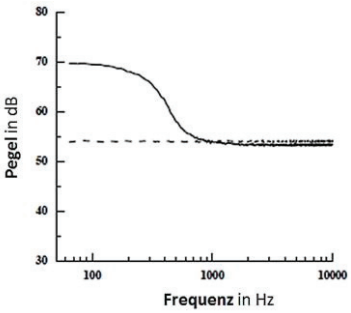

Abb. 7: Störgeräusch-Spektren, die in die gemäß Abb. 5 simulierten Räume eingespielt wurden; tiefenbetontes (durchgezogen) bzw. ´weißes´ Rauschen (strichliert)

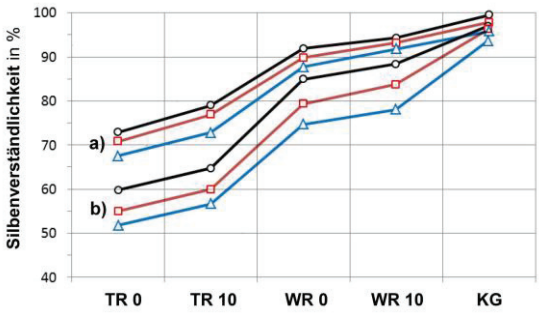

Abb. 8: Verständlichkeit bei Störung durch unterschiedliches Rauschen bei 8 bis 9 (blaue Kurven), 10 bis 11 Jahre alten Schülern (rote Kurven) und Erwachsenen (schwarze Kurven) für a) T bei 0,6 s, b) bei 1,2 s

Abb. 8 verdeutlicht den Einfluss des Alters der Probanden: Je jünger diese sind, umso schwerer fällt ihnen offensichtlich das Verstehen und zum umso lauteren Artikulieren tendieren sie erfahrungsgemäß in einer realen Unterrichtssituation – mit den bekannten fatalen Folgen (*Lombard*-Effekt). Diese Ergebnisse lassen keinen Zweifel zu, dass die tiefen Frequenzen bei der raumakustischen Gestaltung besonders hohe Aufmerkamkeit verdienen, gerade hinsichtlich junger oder hörbehinderter Personen.

4. Sprachverstehen bei verschiedenen Geräuscharten

Abb. 99 zeigt die Ergebnisse bei Überlagerung mit sehr verschiedenen Geräuschen, wiederum bei SNR = 10 bzw. 0 dB(A), für zwei simulierte Räume mit gleichem, in der Praxis leider oft „normalem“ Bassverhältnis BR ≈ 1,3 aber unterschiedlicher mittlerer Nachhallzeit = 0,83 bzw. 1,3 s.

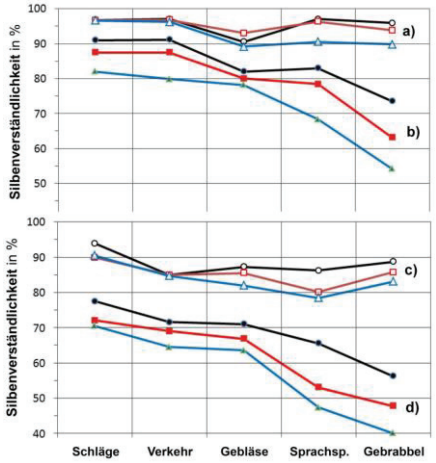

Abb. 9: Verständlichkeit bei Schülern wie in Abb. 8; a) T_m = 0,83 s, BR ≈ 1,3, SNR = 10 dB(A), b) T_m = 0,83 s, BR ≈ 1,3, SNR = 0 dB(A), c) T_m = 1,30 s, BR ≈ 1,3, SNR = 10 dB(A), d) T_m = 1,30 s, BR ≈ 1,3, SNR = 0 dB(A)

Bei der niedrigeren Nachhallzeit und großem Störabstand bleibt die Verständlichkeit für alle Geräuscharten größer als 90 %. In regelmäßigen Abständen von 1,6 s eingespielte Schlaggeräusche verursachen in allen Fällen die geringsten Einbußen, wohl weil den Probanden zwischen zwei Pegelspitzen Zeit bleibt, um bei um 11 dB ruhigeren Pausen Testsilben noch gut zu verstehen. Etwas kritischer stellt sich, insbesondere bei geringem Störabstand, ein gleichmäßiges Verkehrsgeräusch dar. Noch geringere Verständlichkeit ergibt sich für eingespieltes Gebläsegeräusch. Deutlich schlechtere Ergebnisse werden erzielt durch Rauschen, dessen Spektrum der Sprache nachgebildet wurde. Das wichtigste Ergebnis ist aber, dass Personen jeden Alters (bei stets gleichem Störpegel) objektiv am stärksten durch ein natürliches Stimmengewirr gestört werden, besonders in akustisch schlecht konditionierten Räumen. Wieder sind es die jüngsten Schüler, die von jedem „Gebrabbel“ am meisten gestört werden, abzulesen an Ergebnissen von 54 % für T_m = 0,83 s und nur noch 40 % für 1,3 s.

5. Maßnahmen in Unterrichtsräumen

Seit 2011 wurden bereits weit über 100 Unterrichtsräume mit Schallabsorbern saniert, die keine ihrer stets kostbaren freien Begrenzungsflächen belegen und deshalb nützliche Reflexionen bei höheren Frequenzen zulassen, s. [4, Abschn. 10.3]. Nur in Kanten des Raumes installiert, erfüllen sie viel effizienter als in seinen Flächen ihre Aufgabe breitbandig, aber besonders bei den tieferen Frequenzen, wo regelmäßig der größte Nachholbedarf besteht.

So auch in 2 fast baugleichen Hörsälen der TU Graz, die beide zunächst konventionell in 1 m Abstand zur Fensterwand mit 50 cm tief abgehängten ´Akustikdecken´ aus Mineralfaserplatten ca. 3,6 m über dem schallharten Boden ausgestattet wurden. Diese sorgen zwar, wie so oft, für die Einhaltung der Sollwerte bei mittleren Frequenzen, z.B. im Raum i14 mit einem Volumen von 295 m^3: T_m ≈ 0,76 s plus maximal 20%. Aber bei 250, 125 und 63 Hz wird der Sollwert um ca. 35, 62 und 77% überschritten (Abb. 10).

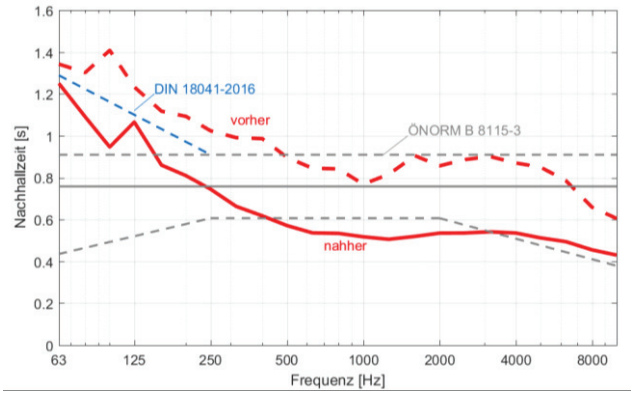

Abb. 10: Nachhallzeit im möblierten unbesetzten Hörsaal i14; nur mit 50 cm tief gehängter Mineralfaser-Unterdecke (rot strichliert), zusätzlich mit 10 mittel- und hochfrequent absorbierenden porösen Wandpaneelen (rot) nach [5], Toleranzbereich aus [6] (grau strichl.) und [1] (blau strichl.)

Abb. 11: Raum i14 mit Akustikdecke plus 10 zusätzlichen, 5 cm dicken Akustikpaneelen an drei Wänden

In diesem Raum wurden zusätzlich 10 Wandpaneele aus Akustikvlies in den Abmessungen 1,8 x 1,2 x 0,05 m, also 21,6 m^2, auf 3 Wände verteilt, was immerhin 30% der Grundfläche entspricht (Abb. 11). Das so erzielte Ergebnis in Abb. 10 kann nicht überraschen: Zwischen 500 und 2500 Hz unterschreitet die Nachhallzeit jetzt den Sollwert um 30%. Bei 125 und 63 Hz beträgt die Überschreitung aber immer noch 40 bzw. 65%. Besonders negativ für die Nutzbarkeit dieses Raums wirkt sich der nun noch steilere Anstieg seines Nachhalls zu tiefen Frequenzen aus, der bei Besetzung noch zunähme. Auf tieffrequente Laute antwortet der Raum nach wie vor mit starkem Dröhnen, die Sprachverständlichkeit ist entsprechend schlecht und die Stimmanhebung wird weiter herausgefordert.

Nebenan im Raum i15 fügen sich nun 65 cm breite, vertikale und horizontale, mit Mineralwolle gefüllte Gipskarton-Koffer in die ohnehin stark gegliederte Flurwand ein (1 bis 3 in Abb. 12). Die GK-Lochplatten (4), die in einem 42 cm breiten Streifen die Unterdecken-Paneele an den beiden Querwänden auf einer Länge von jeweils 3,6 m ersetzen und mit 30 cm Mineralwolle-Auflage versehen wurden, fallen kaum ins Auge. Diese bereits in ganz unterschiedlichen architektonischen Situationen realisierten ´Kanten-Absorber´

sind robust und können bei jeder Renovierung einfach mit übergestrichen werden. Auch das Erscheinungsbild fiel bei den Nutzern zugunsten dieses sanierten Hörsaals aus.

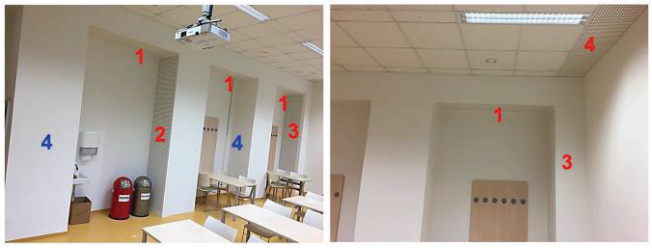

Abb. 12: Kanten-Absorber (1 bis 3) greifen die vorgefundene Gliederung der Flurwand auf und harmonieren optisch mit den schallharten Pfeilern (4). Die mit Mineralwolle hinterlegten GK-Lochplatten (4) ersetzen UD-Platten in einem 42 cm breiten und 3,6 m langen Randstreifen

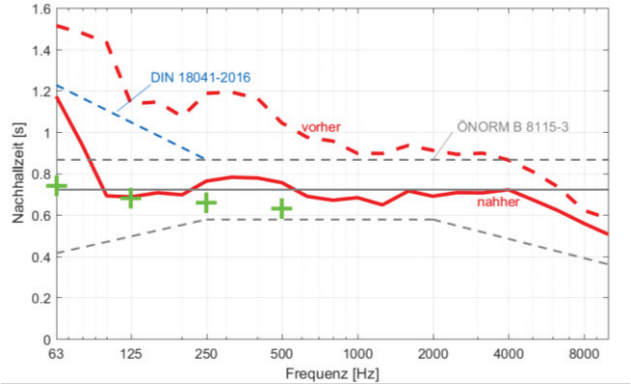

Abb. 13: Nachhallzeit im möblierten unbesetzten Hörsaal i15; nur mit 50 cm tief gehängter Akustikdecke (obere), plus Kanten-Absorber gemäß Abb. 12 (untere Kurve) nach [5], Toleranzbereich aus [6] (strichliert) und Prognose (+)

Der eigentliche Vorteil der hier durchgeführten Maßnahmen, die deutlich weniger als die konventionellen nebenan kosteten, liegt natürlich in ihrer schalltechnischen Wirksamkeit: Das zunächst zu den Tiefen stark ansteigende Spektrum wurde zwischen 100 und 4000 Hz fast konstant auf den Sollwert von hier 0,73 s vergleichmäßigt (Abb. 13). Die Abschätzung in der Planungsphase, die auf Erfahrungen aus früheren Sanierungen beruht, wurde recht gut bestätigt. Wegen der in kleinen Räumen stets starken Streuungen bei den Tiefen sollten die Abweichungen bei 63 Hz auch nicht verwundern. Das Dröhnen ist jedenfalls deutlich reduziert. Beide Räume eignen sich nun im Vergleich für weitere psychoakustische Studien.

6. Schlussfolgerungen

Für alle geltenden Normen [1, 6, 7] stehen die Nachhallzeit und damit die im Raum notwendige Absorption im Vordergrund. Nach der ÖNORM B 8115-3 sowie der DIN 18041-2004, sollte diese aus guten Gründen [4, Abschn. 13.4] bis 63 Hz nicht mehr als 20% über T_{soll} ansteigen, ein Ziel, das durch praktische Erfahrungen und die neueren wissenschaftlichen Erkenntnisse untermauert wird. Mit der grund- und maßlosen Toleranz nach DIN 18041-2016 (Abb. 4) würde man allen Nutzern, die auf Deutlichkeit von Sprache sowie Klarheit von Musik angewiesen sind, einen Bärendienst erweisen. Die im Beitragstitel gestellte Frage ist wohl mit einem klaren Nein zu beantworten.
Im britischen Building Bulletin BB 93-2003 wurde zwar mit 0,8 s für höhere Schulen und 0,6 s für Grundschulen sowie 0,4 s nach BB 93 ´High´ für behinderte Schüler ein hoher Anspruch erhoben, aber zunächst nur für die mittleren Frequenzen. In einer umfangreichen Studie [8] wird aber überzeugend dargestellt, dass erst ein breitbandig niedriger Nachhall den Anforderungen der British Association of Teachers of the Deaf BATOD [9] gerecht wird. Diese Ergebnisse zeigen, dass sowohl die A-bewertet gemessenen äquivalenten Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ als auch die Grundgeräuschpegel $L_{A,90}$ während einer Unterrichtsstunde viel stärker sinken, als es physikalisch der zusätzlich eingebrachten Absorption entsprechen würde. So kann der mittlere Störabstand für eine Stimme (meist die der Lehrkraft) stressfrei auf bis zu 20 dB vergrößert werden [3, T. 2] – ein Segen für Lernprozesse, die auf verbal-auditiver Kommunikation beruhen, also auf Sprechen (Informieren und Erklären) und Hören (Verstehen und Verarbeiten)!

So wie sie sich jetzt empfiehlt, kann DIN 18041-2016 keine richtungsweisende oder verbindliche Norm darstellen. Drei Fehleinschätzungen sind besonders zu kritisieren:

- Eine unrealistische Strategie zur Moden-Bändigung durch die Raumgeometrie (besser: weg von Primärstruktur – hin zu Sekundärmaßnahmen!),
- Falsche Einschätzung der notwendigen Schallabsorption (besser: weg von mittleren – hin zu tieferen Frequenzen!)
- Ungünstige Platzierung ineffizienter Absorber im Raum (besser: weg von Decke und Wänden – hin zu den Kanten!)

Literatur

[1] DIN 18041-2016 Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung

[2] Cremer L (1948) Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band 1: Geometrische Raumakustik

[3] Fuchs HV (2018) Thesen zur Akustik anspruchsvoller Räume. Teil 1: Bass-Verhältnis und Hörsamkeit in größeren Räumlichkeiten. Akustik Jour. 2.2018, S. 31-45. Teil 2: Bass-Verhältnis und Schalbelastung in kleineren Räumlichkeiten. Akustik Journal 3.2018, S. 39-51

[4] Fuchs HV Raum-Akustik und Lärm-Minderung. Berlin: Springer, 2017

[5] Fuchs HV; Graber G; Hetz S; Kordesch J; Balint J (2017) Harte Kanten für klare Worte. Trockenbau Akustik 34, H. 6, S. 70-73

[6] ÖNORM B 8115-3 (2005) Schallschutz und Raumakustik im Hochbau – Teil 3: Raumakustik

[7] ISO 3382-1 (2009) Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters

[8] Canning D, James A (2012) The Essex Study – Optimised classroom acoustics for all. Association of Noise Consultants, St. Albans www.theanc.co.uk

[9] Simpson P (2018) Classroom Acoustics - recommended standards. www.batod.org.uk/information/acoustics-listening-and-learning