Nachhallzeiten von Klassenräumen, eine bundesweite Erhebung

Carsten Ruhe

Bereits seit 2009 gilt in der Bundesrepublik die (UN-Konvention 2009) über die Rechte von Menschen mit Behinderungen. Nach Artikel 24 haben diese ein Recht auf Bildung ohne Diskriminierung und auf der Grundlage der Chancengleichheit. Dazu sollen Vorkehrungen für die Bedürfnisse des Einzelnen und individuell angepasste Unterstützungsmaßnahmen getroffen werden. 2010 ist die Norm über barrierefreie öffentlich zugängliche Gebäude erschienen (DIN 18040-1 2010). Entsprechend fordern

die Bauordnungen der Länder für bestimmte Gebäudearten, darunter die Bildungseinrichtungen, eine (dann auch akustisch) barrierefreie Errichtung für alle Menschen bzw. entsprechende Umbauten. Schwierigkeiten, die Sprache zu verstehen, haben in diesen Räumen nicht nur schwerhörende Personen, sondern auch fremdhörende mit Migrationshintergrund und zum großen Teil sogar guthörende. Nachbesserungen/Anpassungen finden bisher fast nur in Einzelfällen statt, obwohl der tatsächliche Bedarf riesig ist. Die Erhebung, über die hier berichtet wird, zeigt sehr deutlich die Notwendigkeit umfassender Maßnahmen auf.

Inklusion haben wir dann erreicht, wenn wir aufhören können, sortiert zu denken.

Anlass

Für den Beitrag über die Geräusche dezentraler Raumluft-Filteranlagen zur DAGA2022 (Ruhe 2022a) wurden die mittleren Nachhallzeiten und Volumina von Klassenräumen benötigt. Die dortige Abb. 8 ließ bei 140 Messwerten für ein mittleres Volumen von 205 m^3 mit T_m = 0,70 s erhebliche Abweichungen von der Anforderung für die Raumgruppe A4 nach (DIN 18041 2016) (inklusiver Unterricht: T_{soll} = 0,46 s) erkennen. Daraus entstand die Idee, für eine größere Datenbasis nicht nur die Kolleg*innen des FA Bau- und Raumakustik und der VMPA-Güteprüfstellen, sondern auch weitere Personenkreise aus dem schulischen Bereich und aus den Unfallkassen der Länder um Daten von Nachhallzeit-Messungen in Klassenräumen aus den letzten Jahren zu bitten. Auch wurde abgefragt, ob die Messungen wegen Beschwerden, als Vorbereitung einer Sanierung oder als Abnahmemessungen nach Fertigstellung ausgeführt wurden. Möglicherweise lässt sich aus den Beschwerde-Fällen auch ein Schluss auf die Bedeutung der tiefen Frequenzen ziehen.

Datenerhebung

Bis Anfang März 2023 kamen von 47 Berufs-Akustiker*innen und 15 Förder-Schulen aus allen 16 Bundesländern insgesamt 2130 vollständige Datensätze zusammen.

Diese großartige Bereitschaft so vieler Institutionen, an der Umfrage teilzunehmen und (mit dem entsprechenden Zeitaufwand) so viele Datensätze aus den Unterlagen herauszusuchen und zusammenzustellen, zeigt deutlich, für wie wichtig diese Fachleute eine gute Klassenraum-Akustik ansehen. Die wissenschaftlichen Untersuchungen über den damit verbundenen Lernerfolg aller Kinder (guthörende, schwerhörende und fremdhörende gleichermaßen) belegen diese Notwendigkeit seit Jahren eindeutig (Mac Kenzie & Airey 1999), (Oberdörster & Tiesler 2006), (Canning & James 2012). Bereits 2015 hat anlässlich der Vorstellung des Entwurfes von DIN 18041 der damalige Ausschuss-Vorsitzende festgestellt:

In der Klassenraum-Akustik gibt es keinen wissenschaftlichen Forschungsbedarf mehr, nur noch Umsetzungsbedarf!

Auswertungen

Die prozentualen Anteile der Akustiker*innen und Schulen (76/24%) und der Datensätze (68/32%) sind ähnlich. Der Anteil der von den Förderschulen gelieferten Daten ist beachtlich und unerwartet hoch.

Die BU-Pädagogen der Förderschulen erheben die Daten im Zusammenhang mit der wohnortnahen inklusiven Beschulung von Kindern mit Hörschädigung. Hier gibt es fast immer einen Anlass, kurzfristig nach der Messung auch eine Maßnahme zur Ertüchtigung durchzuführen. Dagegen wird bei entsprechenden Schulen ohne ein aussagekräftiges Messergebnis meistens nichts gemacht und das Kind muss „irgendwie auch so“ zurechtkommen. Bedenkt man, dass die teilnehmenden Ingenieurbüros aus allen 16 Bundesländern kommen, die teilnehmenden Förderschulen aber nur aus neun (und dort auch nur einige, nicht alle), so ist der Anteil von deren Messdaten noch bemerkenswerter. Der Wert dieser schulischen Messungen ist also ganz erheblich und der persönliche Einsatz der entsprechenden Lehrkräfte kann gar nicht hoch genug gelobt werden. Bei der Auszählung der beteiligten Schulen fällt auf, dass in BWÜ sehr viele (6 von 12) Schulen Messergebnisse geliefert haben, in Niedersachsen immerhin 2 von 5, aber z. B. in Bayern nur 1, diese dann aber wiederum mit erstaunlich vielen Messergebnissen. Der Einsatz für die Kinder hängt also an den Personen, die sich dafür interessieren, die Messungen für wichtig halten, auch viel Zeit opfern und nicht von den Schulleitungen „zurückgepfiffen“ werden. Weitere Förderschulen sollten sich unbedingt beteiligen. Eine offizielle Unterstützung des BDH und der Arbeitskreise für Pädagogische Audiologie wäre sicher hilfreich, wenn es darum geht, für die Lehrkräfte die entsprechenden Stunden zur Verfügung zu stellen. Seminare zur Schulung und Fortbildung werden bundesweit angeboten.

Tabelle 1: Beteiligte Umfrage-Teilnehmende

47 AKUSTIK-BÜROS		ABO	ABS	ALB	AMB
APN	ASB	ASL	BAE	ENGEL	FHR
FÖRSTER	FuS	GAF	GB	GENEST	GM
GTA	HfT	HPB	HuUDD	IAB	IBAB
IBN	I-BRAS	IFAS	ISS	KÖTTER	KSZ
KuF	KUHN	KuK	KWA	MBBM	MÖHLER
OuT	PEUTZ	PMI	RAUMING	SCA	SuB
SuW	TAC	TuR	TuT	TÜV-NORD	TÜV-SAAR
UK-NORD					
15 FÖRDER-SCHULEN					
ALTSH.	BÜREN	EUSKI.	ERFURT	FRANKF.	HILDESH.
KARLSR.	MANNH.	MÜNCHEN	NEUWIED	OLDENB.	OLPE
SCHLESW.	SCHW.GD.	STEGEN			

Die Verteilung der Datensätze auf die Bundesländer im Vergleich zum jeweiligen Bevölkerungsanteil ist sehr ungleichmäßig. Während aus BAY und NDS jeweils allein von einer einzelnen Person etwa 300 Datensätze übersandt wurden, liegen aus NRW (129), SAA (2), BRB (21) und SAC (17) prozentual deutlich zu geringe Anteile vor. Das ist bei der späteren Beurteilung zu bedenken. Im Vergleich alte/neue Bundesländer betragen die Bevölkerungsanteile etwa 4/1, die der Datensätze aber nur 6/1.

Der bundesweite Mittelwert der Raumvolumina liegt jetzt bei 206 m^3 und die mittlere Nachhallzeit der unbesetzten Räume ist von T_m = 0,70 s auf T_m = 0,78 s angestiegen.

Die Kurve der unteren Standardabweichung tangiert gerade eben die obere Grenze des Toleranzbereichs. Die Häufigkeitsverteilung der mittleren Nachhallzeiten in einer Stufung von 0,05 s Breite und die zugehörige Verteilungsfunktion (= Summe über die Klassen) zeigt die Abbildung 3.

Weil das Baualter der untersuchten Schulen bis an das Ende des 19. Jahrhunderts zurückreicht, werden die Messwerte nicht nur mit den Vorgaben aus (DIN 18041:2016) verglichen (T_{soll} = 0,46 s), sondern auch mit denen der vorherigen Fassungen von (DIN 18041 2004) (T_{soll} = 0,57 s) und (DIN 18041 1968) (T_{soll} = 0,67 s). Bei dem letztgenannten Wert ist aber zu beachten, dass er für Räume zur Sprachdarbietung – noch ohne Beachtung von Inklusion – galt. Nach heutiger Norm entspräche das der Raumgruppe (RG) A2 mit T_{soll} = 0,72 s. Sollwerte für Unterrichtsräume waren damals noch nicht explizit benannt.

Bezogen auf die heutige RG A4 mit T_{soll} = 0,46 s erfüllen lediglich 7 % der bundesweiten Messwerte die Anforderung. Nach der Vorgänger-Norm (jetzt RG A3) mit T_{soll} = 0,57 s sind es immerhin 25 %. Selbst der „ganz alte“ Bezugswert von 0,67 s wird von nicht einmal der Hälfte der Messwerte eingehalten. Vergleiche hierzu die grüne, orangene und rote Grenzwert-Linie in Abbildung 3. Aus der Arbeit von (Oberdörster & Tiesler 2006) (dort Abb.5.14) stammt die um einige eigene Messwerte ergänzte Abbildung 4. Sie beschreibt für den Bereich von 0,3 s bis 0,8 s den Zusammenhang zwischen Nachhallzeit und Sprachverständlichkeit (dargestellt durch den Sprachübertragungsindex STI) nach (DIN EN 60268-16 2012) in Klassenräumen. Mit der heutigen Norm-Anforderung für Klassenräume des mittleren Volumens V = 206 m^3 von T_{soll} = 0,46 s wird ein STI > 0,75 erreicht. Weil die Sprachverständlichkeit bei längeren Nachhallzeiten schlechter wird, wird der Lernerfolg aller Kinder durch die zu langen Nachhallzeiten stark beeinträchtigt.

Wenn man sich traut, die Regressionsgerade noch weiter nach rechts zu verlängern, dann kommt man bei T > 1,3 s (das sind immerhin noch 9% der Klassenräume) auf eine Sprachverständlichkeit, die der von Bahnhofshallen ähnelt. Deshalb heißt es in DIN 18041 nicht ohne Grund: *Die raumakustische Situation für Sprachkommunikation wird umso günstiger empfunden, je kürzer die Nachhallzeit ist. … Im Zweifelsfall sollten in Räumen zur Sprach-Information und -Kommunikation eher*

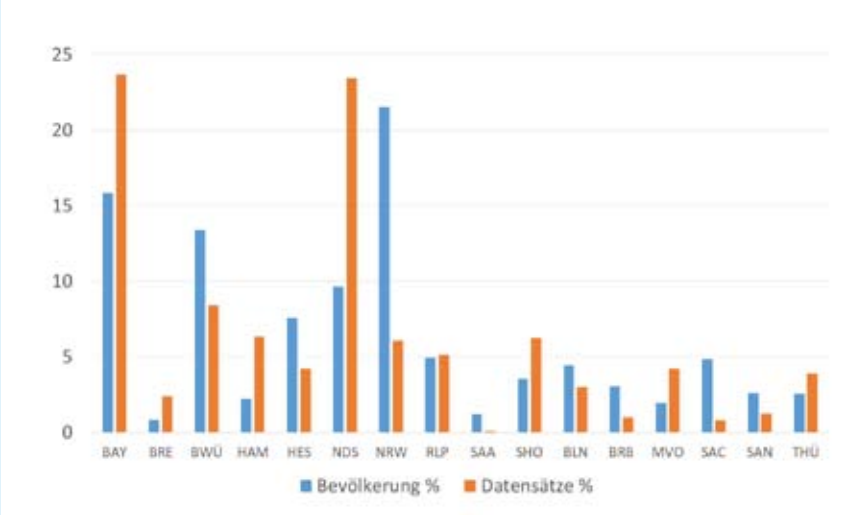


Abbildung 1: Prozentuale Anteile der Bevölkerung in und der Datensätze aus den Bundesländern, nur in wenigen Fällen sind die Anteile relativ gleich

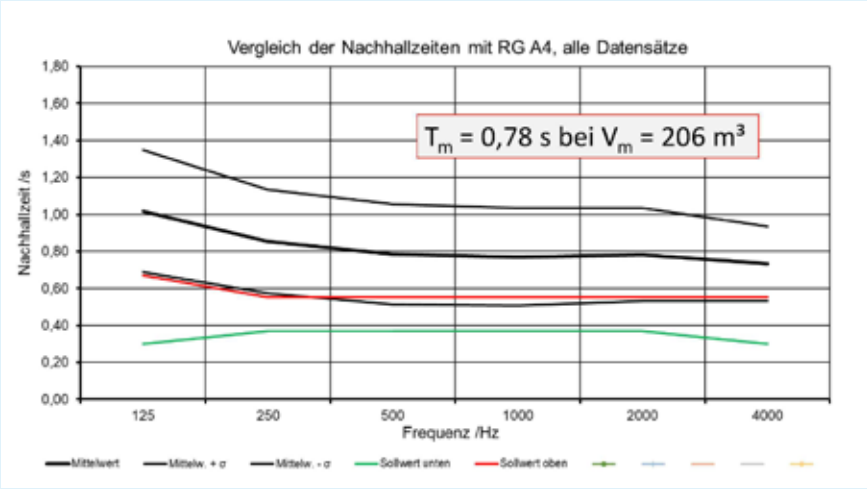


Abbildung 2: Oktavwerte der mittleren Nachhallzeiten und der Standardabweichungen gegenüber dem Toleranzbereich der Soll-Nachhallzeit T_{soll} = 0,46 s für V = 206 m^3 in Raumgruppe A4

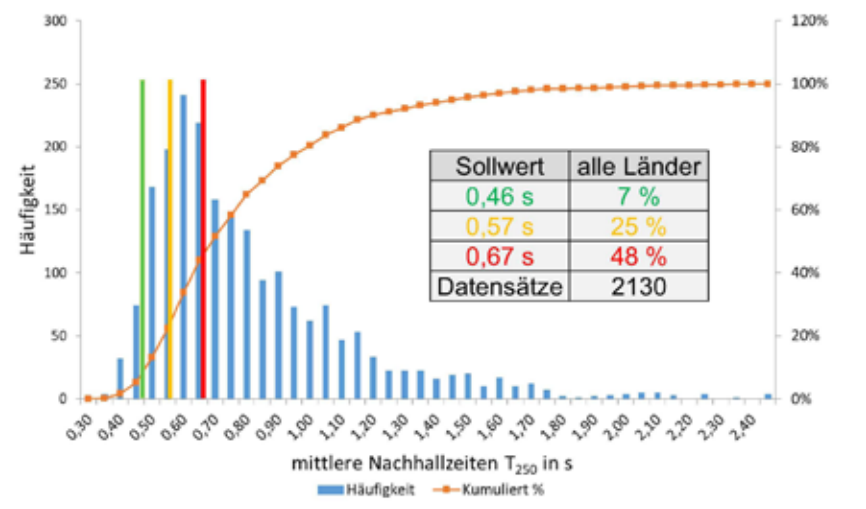


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung und Verteilungsfunktion der bundesweiten mittleren Nachhallzeiten mit Grenzwert-Linien für die Sollwerte von 2016, 2004 und 1968

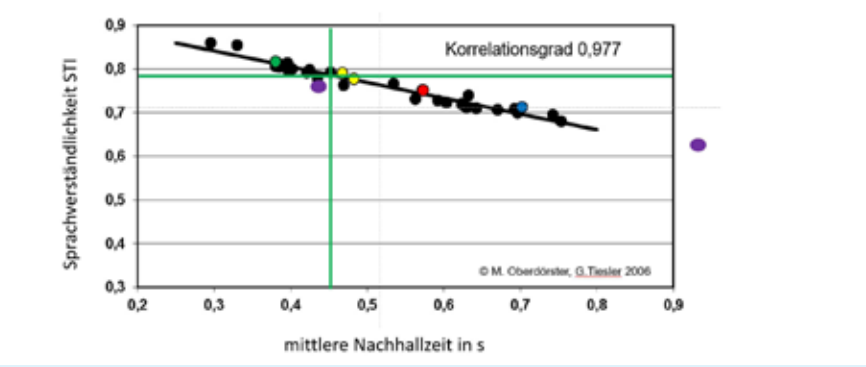


Abbildung 4: Sprachverständlichkeit STI in Abhängigkeit von der Nachhallzeit T in etwa 200 m³ großen Klassenräumen, violett: Messwerte aus Abbildung 5

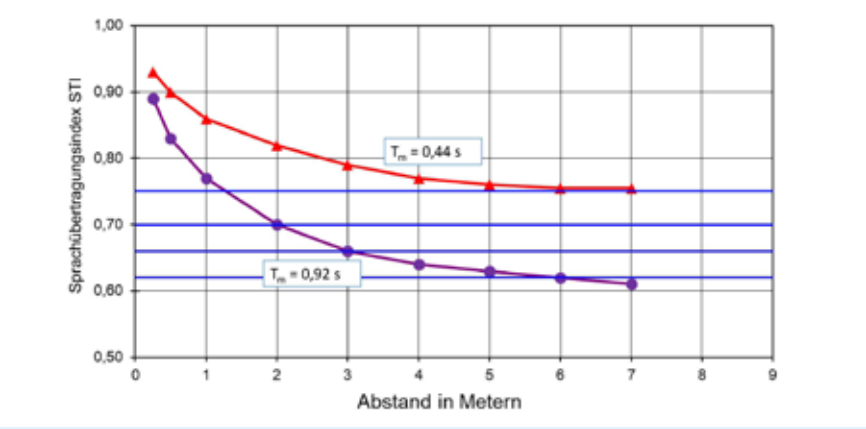


Abbildung 5: Sprachverständlichkeit STI bei verschiedenen Abständen von der sprechenden Person in Klassenräumen mit T_m = 0,44 s bzw. T_m = 0,92 s und Grenzwert-Linien der Kategorien A bis D nach DIN EN 60268-16

kürzere als längere Nachhallzeiten realisiert werden.

Hinzu kommt, dass der STI nicht im gesamten Klassenraum gleich ist, sondern sich mit zunehmendem Abstand vom Sprecher verschlechtert, weil das Direktschall-Diffusschall-Verhältnis ungünstiger wird. In Abbildung 5 sind zwei STI-Kurven für etwa gleich große Klassenräume dargestellt, deren Nachhallzeiten sich um den Faktor 2 unterscheiden (T_m = 0,44 s bzw. 0,92 s). Deutlich sind einerseits der Abstand zwischen den beiden Kurven und andererseits die STI-Abnahme mit zunehmender Entfernung zu erkennen.

Im informativen Anhang von DIN EN 60268-16, Tabelle G.1 ist für „komplexe Nachrichten mit unbekannten Wörtern“ ein Nennwert STI>0,66 genannt. Im Klassenraum mit längerer Nachhallzeit wird er in diesem Beispiel-Fall bereits ab 3 m Abstand von der sprechenden Person unterschritten.

Auswertung nach Bundesländern

Das Bauen ist Ländersache. Deshalb wurden die Nachhallzeiten auch für alle Bundesländer einzeln ausgewertet. Um die Darstellung nicht zu unübersichtlich zu machen, sind die alten und die neuen Bundesländer getrennt abgebildet.

Berlin ist in Abbildung 7 als „neues“ Bundesland aufgeführt. Da aber zahlreiche Messwerte aus dem ehemaligen Westteil der Stadt stammen, sind die Messergebnisse (im Verhältnis zu denen der anderen neuen Länder) ungewöhnlich günstig und die Kurve liegt ganz unten.

Aufgrund der großen Datensatz-Anzahl (1830) liegen die Mittelwerte der alten Bundesländer recht nahe beieinander. Lediglich RLP weicht auffällig ab. Für die neuen Bundesländer mit nur 300 Werten ist aber keine gesicherte Aussage möglich, ob die einzelnen Länder tatsächlich so stark differieren. Für die beiden obersten Kurven, BRB und SAC liegen nur 21 bzw. 17 Datensätze vor. Dennoch ist ganz eindeutig zu erkennen, dass die raumakustische Situation in den

neuen Bundesländern nochmals deutlich schlechter ist als in den alten. Das zeigen auch die Abbildung 8 bzw. die Tabelle 2. Der Mittelwert in den neuen Bundesländern ist um über 50 % höher als in den alten.

Tabelle 2: Mittelwerte der Gesamt-Nachhallzeiten in den 10 alten und 6 neuen Bundesländern

	alte Länder	neue Länder
Nachhallzeit	T_m = 0,73 s	T_m = 1,12 s

Die Gesamt-Mittelwerte der einzelnen Bundesländer sind in Abbildung 9 einander gegenübergestellt. Deutlich sind dort die erheblichen Unterschiede zwischen den alten Bundesländern (links) und den neuen (rechts) zu erkennen. Die Werte für SAA sind nicht stichhaltig, weil zu wenige Proben vorliegen.

$T_{m,125}$ kennzeichnet den Mittelwert über die sechs Oktaven von 125 Hz bis 4000 Hz, während bei $T_{m,250}$ nur über die fünf Oktaven von 250 Hz bis 4000 Hz gemittelt wurde. Dazu später mehr.

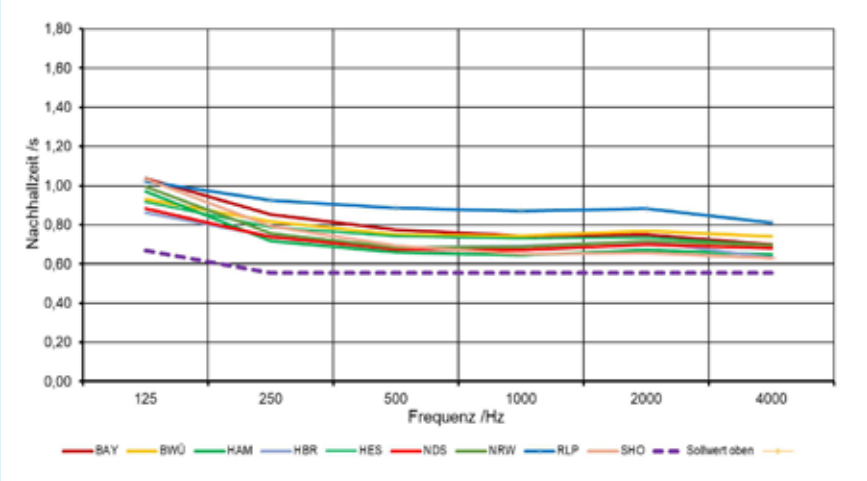
Vergleich mit den Anforderungen

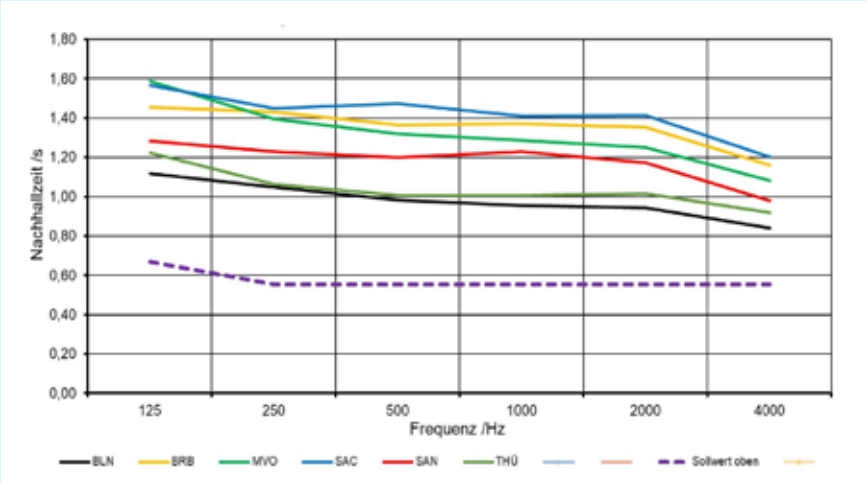
Die Anforderungen der drei verschiedenen Ausgaben von DIN 18041 werden in den alten und neuen Ländern entsprechend den obigen Feststellungen unterschiedlich gut erfüllt. Auch wenn die alten Länder günstiger erscheinen, ist deren Situation dennoch weit davon entfernt, schon als „gut“ zu gelten, siehe Tabelle 3.

Die in den neuen Ländern längeren Nachhallzeiten müssen durch deutlich unterschiedliche Ausstattungen mit weniger Schallabsorptionsfläche begründet sein, denn die mittleren Volumina unterscheiden sich mit 207 m³ bzw. 194 m³ nur wenig; sie sind in den neuen Bundesländern nach Abbildung 10 im Mittel sogar kleiner.

Bedeutung der tiefen Frequenzen

In den letzten 15 Jahren wurde immer wieder einmal behauptet, lange Nachhallzeiten





Abbildungen 6 und 7: Oktavwerte der mittleren Nachhallzeiten für die alten und neuen Bundesländer sowie Obergrenze vom Toleranzbereich zu T_{soll} = 0,46 s (gestrichelt)

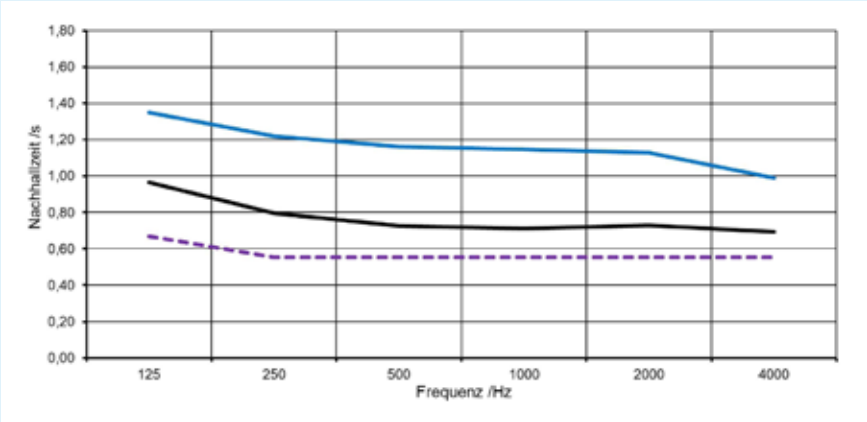


Abbildung 8: Mittelwerte der Oktav-Nachhallzeiten in den 10 alten und 6 neuen Bundesländern (mittig und oben) sowie Obergrenze vom Toleranzbereich zu T_{soll} = 0,46 s (unten gestrichelt); die Kurve für die neuen Bundesländer liegt um über 50 % höher als in den alten

in der Oktave von 125 Hz würden sich besonders ungünstig auswirken und Anlass zu massiven Beschwerden geben. Auch in diesem Sinne wurden die vorliegenden Daten untersucht. Zum Sortieren wurden die Mittelwerte $T_{m,125}$ (Mittelwert von 125 Hz bis 4000 Hz, also 6 Oktaven) und $T_{m,250}$ (Mittelwert von 250 Hz bis 4000 Hz, also 5 Oktaven) ins Verhältnis gesetzt. Anschließend wurde sortiert.

Zunächst wurde für eine Abweichung von mehr als 20% ausgewertet. Weil diese nur für 5% der Datensätze und damit – gegenüber der Behauptung – auf einen recht kleinen Anteil zutrifft, wurden die Abweichungs-Anteile für 15%, für 10% und schließlich auch für 5% erfasst. Das betrifft dann 10%, 25% bzw. 50% aller Datensätze, in den letzten beiden Fällen also ein Viertel bzw. sogar die Hälfte. Erstaunlich sind die zugehörigen mittleren Spektren nach Abbildung 11 im Verhältnis zum Mittelwert aller 2130 Datensätze.

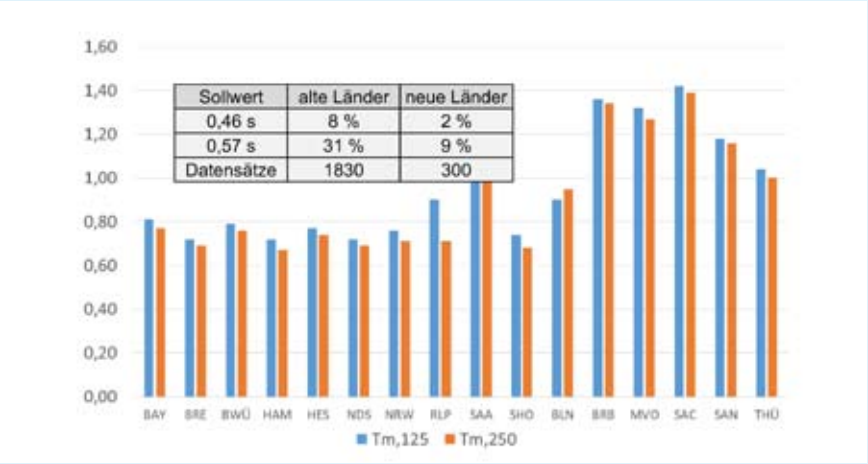


Abbildung 9: Nachhallzeit-Mittelwerte der einzelnen Bundesländer, die der neuen Länder sind auffällig länger als die der alten

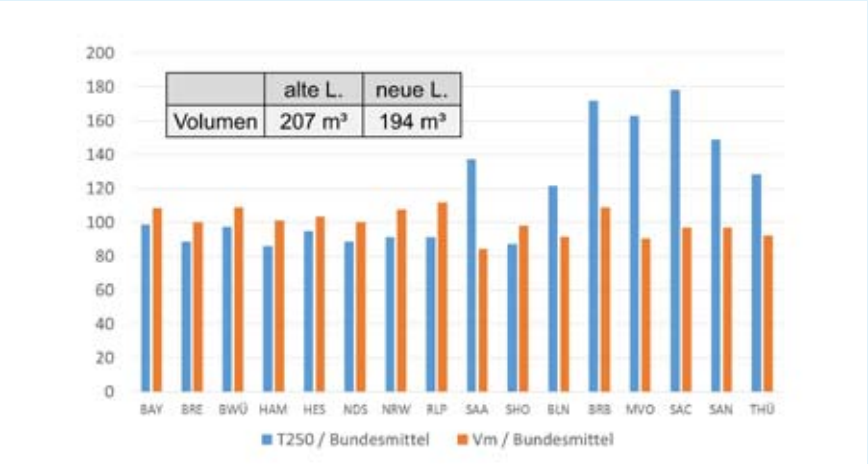


Abbildung 10: mittlere Nachhallzeiten im Vergleich zum Raumvolumen, Angaben jeweils in Prozent zum Bundes-Mittelwert

Hier wird offenbar „auf hohem Niveau gestöhnt"! Zwar sind die Nachhallzeiten bei 125 Hz in diesen Fällen tatsächlich deutlich länger als im Gesamt-Mittelwert. Dafür sind sie aber bereits ab 250 Hz und dann durchgehend bis 4000 Hz deutlich niedriger. Je größer die Abweichung bei 125 Hz ist, desto niedriger liegen die Werte bei den höheren Frequenzen. Besonders lange Nachhallzeiten im Zusammenhang mit gleichzeitig ebenfalls langen Werten im übrigen Frequenzbereich kommen also offenbar nur sehr selten vor und sind deshalb in den Mittelwerten dieser Auswertung nicht erkennbar. Das zeigt auch die Abbildung 12, denn auch in den Standardabweichungen sind bei 500 Hz und höher keine auffällig langen Werte zu entdecken.

Einige eigene Nachfragen bei Lehrkräften im Zusammenhang mit ausgeführten Messungen in den Jahren 2001 bis 2004 führten dagegen zu der Erkenntnis, dass längere tieffrequente Nachhallzeiten nicht beanstandet, kurze Werte bei den mittleren und hohen dagegen (in Bezug auf Sprache und Verständlichkeit im Unterricht) gelobt werden.

Aufgabe für die Hersteller von Deckenplatten

Zwar sind genaue Begründungen für die unterschiedliche Frequenzabhängigkeit der

Tabelle 3: Anteile der Datensätze, die den jeweiligen Anforderungswert einhalten

Anforderung	alte Länder	neue Länder	alle Länder
heute: 0,46 s	8 %	2 %	7 %
2004: 0,57 s	31 %	9 %	25 %
1968: 0,67 s	52 %	20 %	48 %
Datensätze	1830	300	2130

Tabelle 4: absolute und prozentuale Anteile der Datensätze mit auffällig langen tieffrequenten Nachhallzeiten.

$T_{m,125}/T_{m,250}$,	>1,20	>1,15	>1,10	>1,05
Datensätze	132	261	520	1053
/ 2130 Ds.	≈ 5 %	≈ 10 %	≈ 25 %	≈ 50 %

Nachhallzeiten im Mittel und bei den Messungen mit starkem tieffrequenten Anteil noch nicht genau bekannt. Dazu müssten etliche Daten zur Raum-Beschaffenheit und –Ausstattung vorliegen, die nicht abgefragt wurden. Dennoch lässt sich daraus eine Aufgabe an die Produzenten weicher Deckenplatten ableiten. Die härteren Deckenplatten nutzen nämlich offenbar für die tieffrequente Schallabsorption auch den Effekt des „Plattenschwingers“ mit aus. Hier ist zu versuchen, diesen Effekt auch bei den weichen Platten mit anzuwenden. Erste Ideen dazu bestehen.

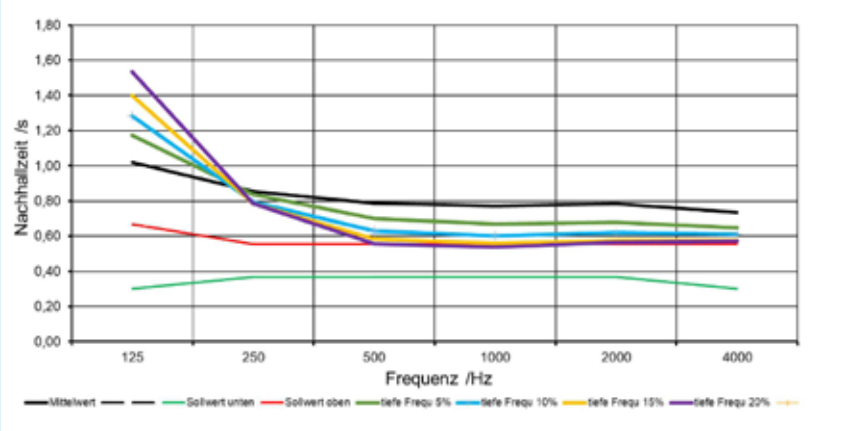


Abbildung 11: Vergleich aller Datensätze zu denen mit auffälligen tiefen Frequenzen und zum Toleranzbereich für T_{soll} = 0,46 s

Gründe für die Messungen

Da bei den Teilnehmenden auch abgefragt wurde, ob die Messungen wegen Beschwerden (B), in Vorbereitung von Sanierungen (S) oder als Abnahmemessungen (A) ausgeführt wurden, konnte auch hiernach ausgewertet werden. Fast alle haben aber mitgeteilt, ihnen falle die Unterscheidung zwischen B und S schwer. Sie wüssten, insbesondere im Nachhinein, nämlich nicht, ob die Sanierung aufgrund von Beschwerden anstehe oder aus anderen Gründen. Diese Unsicherheit lässt sich auch der Abbildung 13 gut entnehmen. Die Angaben sind offenbar sehr willkürlich erfolgt. Man kann aus diesen Daten aber auch ein gewisses „Vorurteil“ der Personen erkennen, welche diese Daten zur Verfügung gestellt haben. Bei den Bundesländern, aus denen mehr Daten aus Schulen kamen als aus Ingenieurbüros (z.B. BAY, BWÜ, HAM, RLP, THÜ) wurden mehr Beschwerden gemutmaßt, bei den Ländern mit vorherrschenden Daten aus Ingenieurbüros (z.B. HES, NRW, BLN, MVO, SAN) dagegen eine Beauftragung dieser Büros wegen anstehender Sanierungen.

Während in den alten Bundesländern die Beschwerden mit 57% und die Sanierungen mit 29% „geschätzt“ wurden, ist das Verhältnis in den neuen Ländern genau umgekehrt. Dort wird offenbar eher die Aufgabe einer Sanierung als Anlass für die Messungen vermutet. Tatsächlich wäre dort aber wegen der durchgängig deutlich längeren Nachhallzeiten für weitaus mehr Räume ein Anlass zur Beschwerde vorhanden.

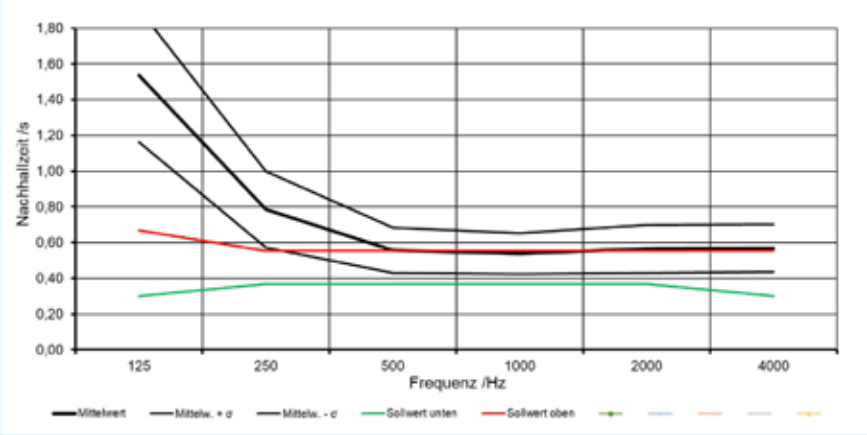


Abbildung 12. Mittelwert und Standardabweichung der Datensätze mit Abweichungen bei tiefen Frequenzen nach dem 20%-Kriterium und Toleranzbereich für T_{soll} = 0,46 s

Die Abnahmemessungen liegen sowohl in den alten als auch in den neuen Ländern einheitlich bei etwa 14% der Datensätze.

Tabelle 5: Anteile der Datensätze für Beschwerde / Sanierung / Abnahme

Länder	Beschwerde	Sanierung	Abnahme
alte	1050 / 57%	538 / 29%	242 / 14%
neue	84 / 29%	164 / 57%	42 / 14%
alle	1134 / 54%	702 / 32%	284 / 14%

Im Bundesmittel liegen die Kurven für die Beschwerdefälle und den Gesamt-Mittelwert fast direkt übereinander, die für die angegebenen Sanierungsfälle etwas höher und die Abnahmemessungen führen zu etwas besseren Werten. Letztere liegen aber über der oberen Toleranzbereichsgrenze, sodass diese abgenommenen Räume im Mittel noch immer nicht die Norm-Anforderungen der Raumgruppe A4 erfüllen.

Auch bei Betrachtung der Werte für die neuen Bundesländer allein bleibt die Reihenfolge der Kurven für Sanierung, Beschwerde und Abnahme von oben nach unten gleich. Nach Tabelle 4 sind die Mittelwerte aber bei Sanierungen über doppelt so viele Stichproben gebildet wie bei den Beschwerden.

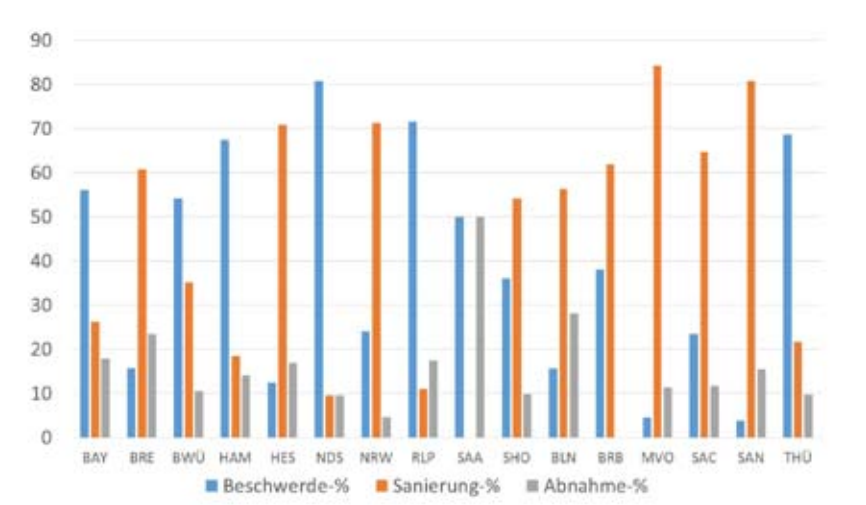


Abbildung 13: Anteile Beschwerde – Sanierung – Abnahme in Prozent

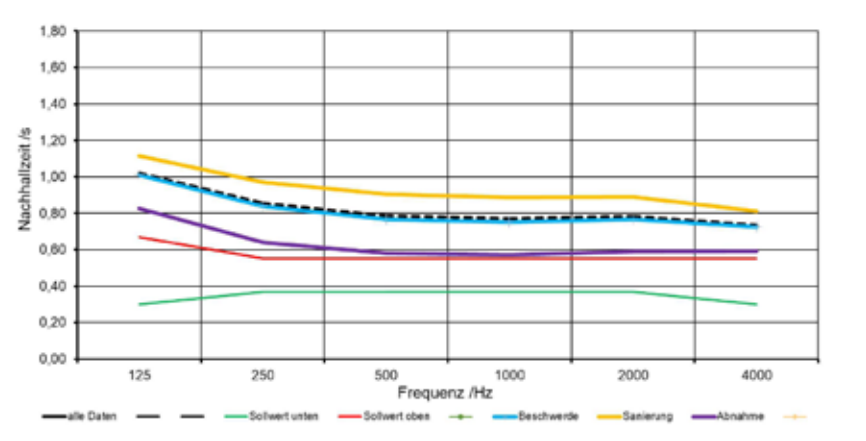


Abbildung 14: Oktavspektren der Bundes-Mittelwerte für Beschwerde, Sanierung und Abnahme

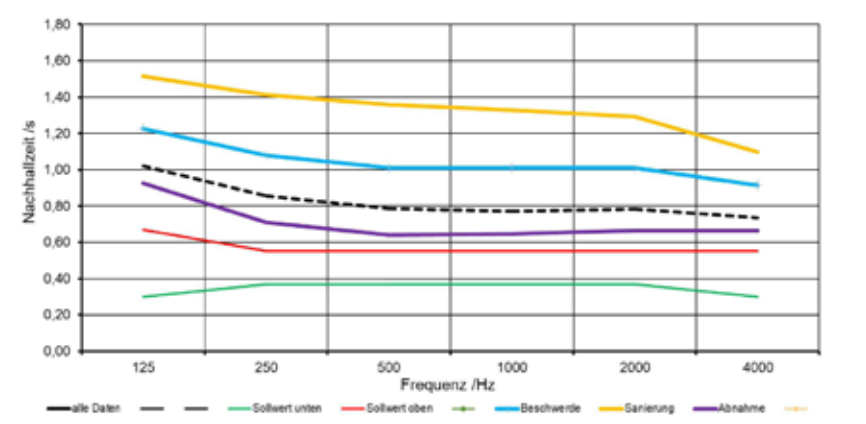


Abbildung 15: Oktavspektren der Neue-Länder-Mittelwerte für Beschwerde, Sanierung und Abnahme

Weder der Abbildung 14 noch der Abbildung 15 sind bei den Kurven für Beschwerden nennenswerte Anhebungen bei 125 Hz zu entnehmen. Hier scheint es sich also wohl doch eher um eine Mär zu handeln…?

Pädagogische Notwendigkeiten

Gute (nachhallarme) Raumakustik

- gewährleistet/vereinfacht die Sprachverständlichkeit (DIN 18041 2016), (Meister 2023)
- mindert Lärm und Störgeräusche (Kneipen- oder Lombardeffekt) (Canning & James 2012)
- vermeidet durch wohnortnahe Beschulung Fahrtkosten für Kinder, die sonst ein Förderzentrum besuchen müssten
- verringert Stress (gut untersucht für die Pädagogen) (Oberdörster & Tiesler 2006)
- verringert Blutdruck-Anstieg (Oberdörster & Tiesler 2006)
- verringert Anstieg der Pulsfrequenz (Oberdörster & Tiesler 2006)
- verbessert den Umgang miteinander (Boltz 2009)
- verbessert den Lernerfolg (Brokmann 2013)
- vermeidet laute Reaktionen (z. B. bei Autismus)
- verringert Gefahr der Lärm-Schwerhörigkeit (z. B. in Sporthallen) (Leistner et al. 2015), (Leistner 2017)
- verringert Gefahr des lärmverursachten Tinnitus (BLLV 2011), (DTL 2004)
- verringert die Sprech-Anstrengung und Stimmerkrankungen
- verringert deshalb den Krankenstand bei Lehrer*innen und Schüler*innen
- verlängert dadurch die Lebens-Arbeitszeit der Lehrkräfte
- spart deshalb Geld

Nur jede vierte Lehrkraft erreicht das Regel-Rentenalter (Statistisches Bundesamt 2018). Tinnitus, Burnout und lärmverursachte Schwerhörigkeit sind die häufigsten Gründe für die Frühberentung von Lehrern, im Mittel mit 63,5 Jahren (Statistisches Bundesamt Presse 2018); in der Statistik verstecken sie sich hinter der Bezeichnung „psychosomatische Beschwerden“ (BLLV 2011). Eine bessere Raum-

akustik könnte also dem Lehrermangel abhelfen.

Dass sich solche Maßnahmen gesamtwirtschaftlich lohnen, zeigt folgende Überschlags-Rechnung: Die Dauer der vorzeitigen Berentung beträgt etwa 45 Monate. Eine akustische Klassenraum-Sanierung kostet etwa so viel wie drei durchschnittliche Ruhegehälter von 3.200,-€ (news4teachers 2019). Könnte die betreffende Lehrkraft allein wegen der besseren Raumakustik bis zur Regel-Altersgrenze arbeiten, würde man den Betrag von 42 Ruhegehältern einsparen und hätte darüber hinaus in diesem Zeitraum eine Lehrkraft mehr zur Verfügung. Die besseren Ausbildungs-, Berufs- und Verdienstchancen der Kinder, verbunden mit wiederum höheren Steuereinnahmen, und auch die geringeren Kosten für die Krankenkassen sind weitere positive Effekte. Auch könnte man für die eingesparten 42 Ruhegehälter weitere 14 Klassenräume sanieren.

Und das gilt alles für Menschen mit und ohne Hörschädigung! Auf der „Empfängerseite“ wird zwar beim schlechten Verstehen meistens nur an Kinder mit Hörschädigung gedacht. Dies wurde in DIN 18041 von 2004 noch durch den Zusatz abgebildet, dass dieser Personenkreis um 20 % kürzere Nachhallzeiten benötigt. Das war sozusagen eine „exklusive Lösung für die ganz besonderen Menschen“. Exklusive Maßnahmen dienen aber nicht der Inklusion! Die jetzige Normfassung von 2016 fordert diese kürzeren Werte jetzt für alle Neu- und Umbauten. Und tatsächlich sind auch alle Kinder betroffen, deren Muttersprache nicht Deutsch ist, ebenso wie deutschsprachige Kinder im Fremdsprachenunterricht! Darüber hinaus ist auch jeder vierte Unterrichtende im Alter oberhalb von 50 Jahren von Schwerhörigkeit betroffen (Sohn & Jörgenshaus 2001). In diesem Sinne ist der Bedarf an verstehgerechter Raumakustik in jedem Klassenraum (und Fach-Klassenraum) vorhanden und nicht ausschließlich in den sogenannten I-Klassen.

Politische Notwendigkeiten

Deshalb: Forderung an die KMK, endlich nur noch (auch raumakustisch) inklusive Schulgebäude bauen zu lassen.

Unterstützung ist anzustreben durch:

- DEGA-Vorstand, ALD-Vorstand
- Behindertenbeauftragte von Bund, Ländern, Kommunen
- Inklusionsbeauftragte von Bund, Ländern, Kommunen
- Universitäten und Hochschulen für Sonderpädagogik
- Pädagogen-Verbände (z. B. BLLV) sowie GEW und DGUV
- Betroffenen-Verbände: z. B. DSB, DCIG, DHV, DG und Tinnitus-Liga
- Berufsverbände der HNO-Ärzte
- sonderpädagogische Fachverbände und Elternverbände
- Krankenkassen
- weitere?

Zusammenfassung

Aus der vorliegenden statistischen Auswertung von 2130 Datensätzen ist sehr eindeutig zu erkennen, dass die Nachhallzeiten im Mittel im gesamten Bundesgebiet (deutlich) ungünstiger sind als die Anforderungen nach DIN 18041 für die heute als Standard geltende Raumgruppe A4. Sie belegt, dass die Kultusministerien der Länder zur konsequenten Umsetzung eines inklusiven Schulunterrichtes bei ihren Bauministerien – und diese bei ihren zu beauftragenden Architekturbüros – umfangreiche Raumakustik-Nachbesserungen und bei Neubauten entsprechend geplante Maßnahmen einfordern müssen. Dafür liefert diese Erhebung die Grundlagen.

Allen an der Umfrage beteiligten Personen und Institutionen wird herzlich für die überaus zahlreichen Datensätze, die Ermunterung weiterzumachen und viele nützliche Hinweise gedankt!

Ausblick: Es ist zu schaffen!

Aus dem mittleren Volumen von $V = 206\ m^3$ ergibt sich bei der heute in Neubauten üblichen Höhe von ca. 3 m eine Grundfläche von etwa 69 m^2. Häufig wurde/wird noch immer die Decke aus „gestalterischen Gründen“ nicht vollflächig mit Absorptionsmaterial belegt. Bei 80% belegter Fläche beträgt der Deckenanteil 55 m^2. Aus der mittleren Nachhallzeit von $T_m = 0{,}78$ s erhält man (anhand der Sabineschen Gleichung $T = 0{,}16 * V/A$) eine vorhandene Absorptionsfläche $A = 42{,}5\ m^2$. Wenn man die absorbierende Wirkung der Raumausstattung mit z. B. $A = 6{,}6\ m^2$ berücksichtigt, so erhält man für die Deckenfläche einen Schallabsorptionsgrad $\alpha = 0{,}65$. Dieser Wert passt auch zu den Materialien von Deckenbekleidungen in vielen Schulen, die in den letzten 50 Jahren gebaut wurden.

Zur Verbesserung bestehen die beiden Möglichkeiten, einerseits fast die gesamte Decke zu belegen (5% entfallen durch die Lampen) und/oder andererseits Material mit einem Schallabsorptionsgrad von z. B. $\alpha = 0{,}95$ zu verwenden. Damit erhält man Nachhallzeiten gemäß der letzten Spalte von Tabelle 6.

Mit schlussendlich T = 0,48 s ist man auch unter einer günstigen Situation offenbar immer noch nicht ganz am Ziel. Bei dieser sehr einfachen Abschätzung wurde bisher aber auch der in DIN 18041 beschriebene Hinweis nicht beachtet, man solle die Absorber auf unterschiedlich im Raum orientierte Flächen – und damit auch auf die Wände – verteilen. Dadurch vermeidet man nämlich rechnerisch nicht einfach erfassbare Nachhallzeit-Verlängerungen durch sogenannte „Flatterechos“.

Das Rechenverfahren nach (DIN EN 123 45-6 2004) setzt voraus, dass ein ausreichend diffuses Schallfeld geschaffen wird. Dafür ist das Schallabsorptionsmaterial nicht nur in einer Raumdimension (Decke / Fußboden = Höhe) sondern auch in den beiden weiteren (Länge und Breite) angemessen gleichmäßig zu verteilen. Anderenfalls treten zwischen parallelen schallharten Flächen Mehrfachreflexionen auf. Die dadurch entstehenden „Flatterechos“, können die Nachhallzeit über die Rechenwerte hinaus (bisweilen deutlich) verlängern. Die obige Berechnung ist deshalb „falsch“, weil sie die Feinstruktur des Schallfeldes nicht berücksichtigen kann.

Mit einem zusätzlichen schallabsorbierenden Rückwandpaneel wird die Übereinstimmung der Berechnung mit der wirklichen Situation deutlich besser. In zahlreichen Veröffentlichungen (Ruhe 2019), (Ruhe & Kiupel 2020), (Ruhe 2020) ist belegt, dass „schallabsorbierende (Rück)-Wandpaneele“ wahre Wunder in Bezug auf die Sprachverständlichkeit bewirken, obwohl rechnerisch die Nachhallzeit nur wenig kürzer wird. Nimmt man z. B. ein Rückwand-Paneel mit 6,0 m Breite, 1,2 m Höhe und $\alpha = 0{,}95$ an, so ergibt sich nach Tabelle 7 eine Nachhallzeit T = 0,44 s.

Oft stehen solche Flächen an der Rückwand nicht zur Verfügung. Dann werden die Absorberflächen als 0,6 m hoher Fries (entsprechend der Plattenbreite des Absorber-Materials) direkt unterhalb der Decke an der Stirnwand, der Flurwand und der Rückwand angebracht. Die mögliche Auskleidungsfläche steigt damit auf etwa 14 m² und die Situation wird noch günstiger.

Während die Klassenräume in der Sekundarstufe oft eher „spartanisch“ eingerichtet werden, sind die der Primarstufe, also für die Jahre des ersten zielgerichteten Spracherwerbs, häufig „kuscheliger“ ausgestattet. Sofas, Kissen, Teppiche und Matten führen auf diese Weise zu einer größeren Schallabsorptionsfläche und so zu einer noch günstigeren Situation.

Oft wird von den Planenden eingewendet, mit „so viel Schallschluckmaterial“ würden die Räume überdämpft und die Sprache käme an den hinteren Plätzen nicht mehr laut genug an. Auch Lehrende aus sanierten Klassenräumen vertreten bisweilen diese Auffassung. Sie wurde aber schon an anderer Stelle widerlegt (Ruhe 2022b). Ganz im Gegenteil heißt es in DIN 18041:

> *Im Zweifelsfall sollten in Räumen zur Sprach-Information und -Kommunikation eher kürzere als längere Nachhallzeiten realisiert werden.*

Tatsächlich liegt aber der Grund für das Gefühl einer Überdämpfung nicht an zu viel, sondern an zu wenig Schallabsorption. Diesen Räumen fehlt nämlich meist das schallabsorbierende Rückwandpaneel, der Schall von vorne breitet sich über die Köpfe der Kinder aus, wird von hinten reflektiert und dann vorne (zwar noch nicht als Echo aber doch störend) wahrgenommen. Um das zu vermeiden, wird leiser gesprochen und dadurch entsteht dann das Gefühl der Überdämpfung (Ruhe 2019), (Ruhe 2020).

Autor
Dipl.-Ing. Carsten Ruhe
hörgerecht planen und bauen
Rethwisch 10, 25497 Prisdorf
www.carsten-ruhe.de

Literatur

BLLV (Hrsg.) (2011) Lärm als Belastungsfaktor in der Schule – ein verkanntes Problem und was man dagegen tun kann.
Boltz W (2009) Deine Kinder sind aber nett geworden! In Bayerische Schule 5/6, S. 30-32
Brokmann H (2013) Schulakustik und Inklusion, Hintergründe und Auswirkungen. In Lärmbekämpfung 5, S. 216-219
Canning D, James A (2012) Essex Study Final Report: Optimised classroom acoustics for all, London South Bank University, The Association of Noise Consultants
DIN 18040-1 (2010) Barrierefreies Bauen, Öffentlich zugängliche Gebäude, Planungsgrundlagen
DIN 18041 (1968) Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen
DIN 18041 (2004) Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen
DIN 18041 (2016) Hörsamkeit in Räumen, Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise zur Raumausstattung
DIN EN 12354-6 (2004) Bauakustik, Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften, Teil 6: Schallabsorption in Räumen
DIN EN 60268-16 (2012) Elektroakustische Geräte, Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex
DTL (Hrsg.) (2004) Tinnitus ist nicht gleich Tinnitus, Ergebnis der Mitgliederbefragung. Deutsche Tinnitus-Liga, Wuppertal
Leistner P, Drotleff H, Leistner M (2015) Akustik in Lebensräumen für Erziehung und Bildung, Richtlinie des Landes Baden-Württemberg, Fraunhofer IBP
Leistner P (2017) Akustik in Sporthallen. In Zukunftsraum Schulen, Vortrag
Oberdörster M, Tiesler G (2006) Akustische Ergonomie der Schule, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Fb 1071
Mac Kenzie DJ, Airey D (1999) „Classroom Acoustics“ Heriot-Watt-University, Department of Building Engeneering and Surveying, Edinburgh
Meister H (2023) Höranstrengung und kognitive Belastung beim Sprachverstehen. In Schnecke 119, S. 44-45
news4teachers (2019) https://www.news4teachers.de/2019/01/das-durchschnittliche-ruhegehalt-fuer-verbeamtete-lehrer-liegt-bei-3-200-euro-brutto/ (2023-03-13)
Ruhe C (2019) Schallabsorbierende Wandpaneele? Ein MUSS in der Klassenraum-Akustik! In Hörgeschädigten-Pädagogik 2, S. 87-91
Ruhe C, Kiupel K (2020) refeRATgeber 6 „Hörgeschädigte Kinder in allgemeinen Schulen“. DSB Deutscher Schwerhörigenbund e. V., Fachreferat Barrierefreiheit
Ruhe C (2020) Gestaltung von Klassen- und Fachklassenräumen für die inklusive Beschulung. In Akustik Journal der DEGA 1, S. 7-23
Ruhe C (2022a) Dezentrale Raumluft-Filteranlagen – zu laut für den Unterricht! In Akustik Journal der DEGA 2, S. 7-21 und Hörgeschädigten-Pädagogik 2, S. 46-57
Ruhe C (2022b) Besseres Verstehen im Klassenzimmer mit Lautsprecheranlage? In Spektrum Hören 3, S. 13-19 und Hörgeschädigten-Pädagogik 3, S. 167-173
Sohn W, Jörgenshaus W (2001) Schwerhörigkeit in Deutschland. Repräsentative Hörscreening-Untersuchung bei 2000 Probanden in 11 Allgemeinpraxen. In Z Allg Med 77: S. 143–147
Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (2018) Schulen auf einen Blick. Wiesbaden
Statistisches Bundesamt Presse (2018) https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/12/PD18_509_742.html (2023-03-13)
UN-Konvention (2009) über die Rechte von Menschen mit Behinderungen, Convention on the Rights of Persons with Disabilities (CRPD) vom 13.12.2006. Resolution 61/106 der Generalversammlung der UNO. In Kraft getreten am 03.05.2008, ratifiziert am 26.03.2009, hier Artikel 24 (Bildung)

Tabelle 6: Nachhallzeit-Abschätzungen nur mit schallabsorbierender Deckenfläche

G_{Decke}	Anteil	S_{Decke}	α	A_{Decke}	$A_{Ausst.}$	A_{Gesamt}	T
69 m²	80%	55,2 m²	0,65	35,9 m²	6,6 m²	42,5 m²	0,78 s
69 m²	95%	65,5 m²	0,65	42,6 m²	6,6 m²	49,2 m²	0,67 s
69 m²	80%	55,2 m²	0,95	52,4 m²	6,6 m²	59,0 m²	0,56 s
69 m²	95%	65,5 m²	0,95	62,3 m²	6,6 m²	68,8 m²	0,48 s

Tabelle 7: Nachhallzeit-Abschätzung mit schallabsorbierender Decken- und Wandfläche

G_{Decke}	Anteil	S_{Decke}	α	A_{Decke}	$A_{Ausst.}$	A_{Gesamt}	T
69 m²	95%	65,5 m²	0,95	62,3 m²	6,6+6,8	75,6 m²	0,44 s