Schallabsorbierende Wandpaneele? Ein MUSS für die Klassenraum-Akustik!

Carsten Ruhe

Einleitung

DIN 18041:2016 fordert für Klassenräume (Raumgruppe A4) mit einem typischen Volumen von 180 m^3 bis 200 m^3 eine Nachhallzeit von T_{soll} = 0,45 s ± 20 %. Auch wenn es rechnerisch „gerade eben" ausreicht, lediglich die Decke vollflächig hochgradig schallabsorbierend zu belegen, ist nicht von vornherein sichergestellt, dass der Raum den Anforderungen an ein barrierefreies Zuhören und Verstehen entspricht. Wenn aber Schallabsorber auch in der zweiten (und gegebenenfalls dritten) Raumdimension angebracht werden, so verbessert sich die Situation schlagartig erheblich und die Räume werden von den Nutzern als viel besser beurteilt.

Im Gegensatz zu den Aussagen vieler Hörer liegen nur wenige messtechnische „Beweise" über diese erheblich bessere Qualität vor. Deshalb sträuben sich die Schulbau-Träger oft, etwa 1.000 € je Klassenraum für ein schallabsorbierendes Rückwandpaneel zu investieren. Auch die Argumente einiger (Raum-)Akustiker, die horizontalen Reflexionen würden ohnehin eher eintreffen als die in der Norm benannten 50 ms nach dem Direktschall, sind in diesem Sinne kontraproduktiv.

Messergebnisse aus Klassenraum-Nachbesserungen und aus verschiedenen neuen Förderzentren für Hörgeschädigte belegen eindeutig den Gewinn durch die Wandpaneele. Offenbar schränken horizontale Schallreflexionen die Sprachverständlichkeit viel früher ein, als erst nach 50 ms. Hierzu werden verschiedene Plausibilitäts-Überlegungen vorgestellt. Man sollte sie wissenschaftlich untersuchen, sobald die Messtechnik dafür angepasst ist.

Die Nutzer waren Auslöser

Zahlreiche Schulen, vorrangig Klassenräume, hat der Autor in den letzten Jahren raumakustisch untersucht. Allein in den Jahren 2016 bis 2018 waren es 27 Schulen mit knapp 100 Räumen. In etlichen Fällen haben sich Lehrer, Schulleiter und sogar Eltern gemeldet und sich für die erzielten Verbesserungen bedankt. Zwei besonders beeindruckende Rückmeldungen hatten folgende Wortlaute:

Bisher habe ich immer gedacht, ich sei als Lehrerin für die Lärm-Minderung in der Klasse ganz allein zuständig. Jetzt habe ich die Raumakustik als Sozial-Pädagogin an meiner Seite.

Seit kurzem kann ich den Klassenraum wieder nutzen, der nach Ihren Messungen und Planungen saniert und umgestaltet wurde. Ich bin ganz begeistert. Die Kinder sind viel ruhiger und auch viel konzentrierter bei der Arbeit. Innerlich habe ich bei denen schon Abbitte darüber getan, dass ich früher so viel geschimpft habe. DIE waren das gar nicht!

Ganz besonders positiv waren die Rückmeldungen seitens der Schulleitungen von Förderschulen für Hörgeschädigte. Auch hierzu ein Beispiel aus dem letzten Jahr:

Von der guten Raumakustik im Neubau sind inzwischen schon alle sehr begeistert! Ich freue mich, Sie bald persönlich in den Räumen begrüßen zu können.

Diese Begeisterung war immer dann herauszuhören, wenn nicht nur die Decken ein hochgradig absorbierendes Material

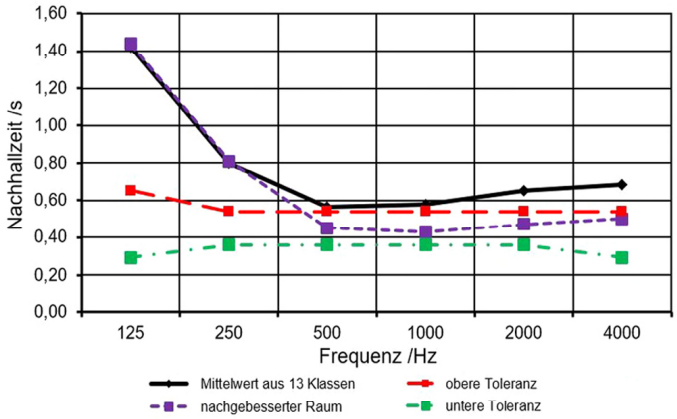

Abbildung 1: Mittelwert von 13 Klassenräumen ohne Wandpaneele und zum Vergleich ein mit Wandpaneelen nachgebesserter Raum

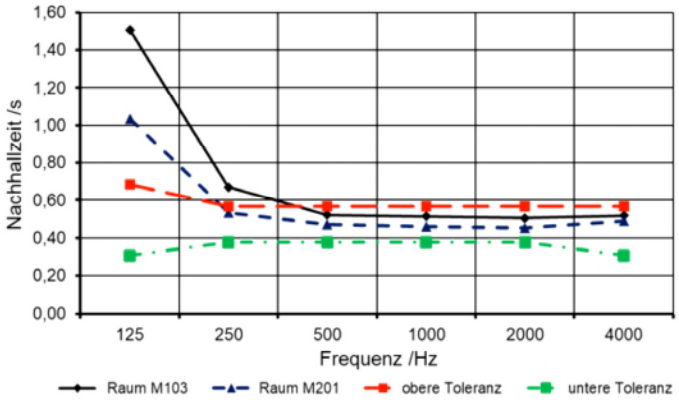

Abbildung 2: Baugleiche und gleich ausgestattete Klassenräume mit unterschiedlichen Nachhallzeiten, die Räume haben Wandpaneele, die Räume werden (trotz langer tieffrequenter Nachhallzeiten) nicht beanstandet.

ausgetauscht erhielten, sondern wenn zusätzlich auch schallabsorbierende Rückwand-Paneele eingebaut wurden. Im vorliegenden Beitrag wird versucht, hierfür eine Begründung herzuleiten.

Übersicht über einige Messungen

Abbildung 1 zeigt Messergebnisse aus einem Gymnasium, in welchem zahlreiche Schüler integrativ beschult werden. Das Gebäude stammt von etwa 1910 und wurde letztmalig etwa 1960 mit den damals üblichen Akustik-Materialien ausgestattet. Den Mittelwert der Messergebnisse aus 13 Klassen- und Fachklassen-Räumen zeigt die dick durchgezogene Kurve. Im Verhältnis zum Baualter sind die Werte erstaunlich gut. Das Messergebnis aus dem für einen Lehrer mit Hörschädigung mit Wandpaneelen nachgerüsteten Klassenraum zeigt die blaue Kurve. Bei 125 Hz und 250 Hz sind die Werte genauso schlecht wie in den anderen Räumen, ab 500 Hz aber deutlich günstiger. Der Lehrer zeigte sich von dieser Maßnahme begeistert.

Solch eine Beurteilung ist für Raumakustiker zunächst nicht nachvollziehbar. Sie konstatieren, bei 250 Hz und 125 Hz liege doch in beiden Fällen eine ganz erhebliche Abweichung von der oberen Toleranzbereichsgrenze vor und deshalb müsse die Situation des nachgerüsteten Klassenraumes genauso schlecht sein wie die der noch nicht nachgerüsteten. Die Nutzer sehen (beziehungsweise hören) das aber durchaus anders.

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse zweier baugleicher Räume aus dem Neubau-Trakt. Trotz identischer Baugrößen und identischer Ausstattungs-Materialien gibt es hier deutliche Unterschiede, die bisher – auch unter Hinzuziehung des Decken-Herstellers – noch nicht geklärt werden konnten. Beide Räume sind mit Rückwand-Paneelen ausgestattet und werden von den Nutzern trotz deutlicher Unterschiede im tieffrequenten Bereich einheitlich als „sehr gut“ bezeichnet.

In Abbildung 3 sind die Messergebnisse aus zwei Räumen in einer Grundschule gegenübergestellt. Über dem Erdgeschoss befindet sich eine Stahlbetondecke, über dem Dachgeschoss ein leichtes Dach. Deutliche Unterschiede zeigen sich im tieffrequenten Bereich, wo durch das Dach viel Schallenergie entweichen kann, (untere Kurve: Raum im EG) während die Stahlbetondecke im Erdgeschoss sie „einsperrt“ (obere Kurve: Raum im OG). Trotz der insgesamt kurzen – Nachhallzeiten – auch bei den tiefen Tönen sind die Lehrerinnen mit der akustischen Situation unzufrieden. Diese Klassenräume haben keine Rückwand-Paneele.

In einer etwa 20 Jahre alten Grundschule mit einem kreisringförmigen Grundriss und entsprechend schiefwinklig zueinanderstehenden Klassenraum-Trennwänden hat man – wegen extrem geringer Rohbau-Höhe – Holzwolle-Leichtbauplatten auf Lattung geschraubt. Die Bekleidung ist nur 65 mm dünn. Die dadurch bedingte geringe Schallabsorption bei den tiefen Frequenzen ist der Abbildung 4 gut zu entnehmen. Wegen Beanstandungen der Lehrerschaft wurden die meisten Räume inzwischen nachgerüstet (40 mm Melamin-Schaum, direkt angeklebt). Ab 500 Hz liegen die Nachhallzeit-Messwerte als Mittelwert aus neun untersuchten Räumen am unteren Rand des Toleranzfeldes, sind also „eigentlich sehr gut“.

Vergleichsweise wurde deshalb der letzte noch nicht nachgerüstete Raum auch gemessen (blaue Kurve). Ab 500 Hz liegen die Messwerte für diesen Raum mitten im Toleranzfeld. Im Vergleich dazu zeigt die schwarze Kurve der Mittelwerte aller nachgerüsteten Räume, dass ab 500 Hz aufwärts die Nachhallzeiten noch kürzer geworden sind, während sich bei 250 Hz und insbesondere bei 125 Hz nur relativ wenig getan hat. Die Lehrerschaft ist trotz der Nachbesserung unzufrieden. Schallabsorbierende Wandpaneele gibt es in keinem einzigen Raum dieser Schule.

Können Wandpaneele denn wirklich so viel?

Abbildung 5 zeigt eine rechnerische Simulation nach der Sabineschen Nachhall-

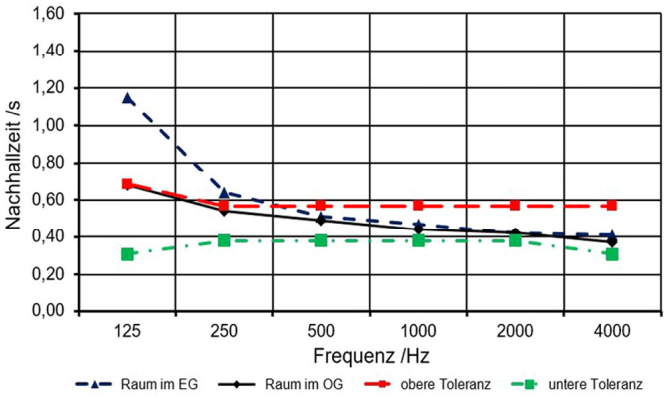

Abbildung 3: Baugleiche und gleich ausgestattete Klassenräume unter Betondecke (Raum im EG) und unter leichtem Dach (Raum im OG); beide Räume werden beanstandet, Wandpaneele sind nicht vorhanden

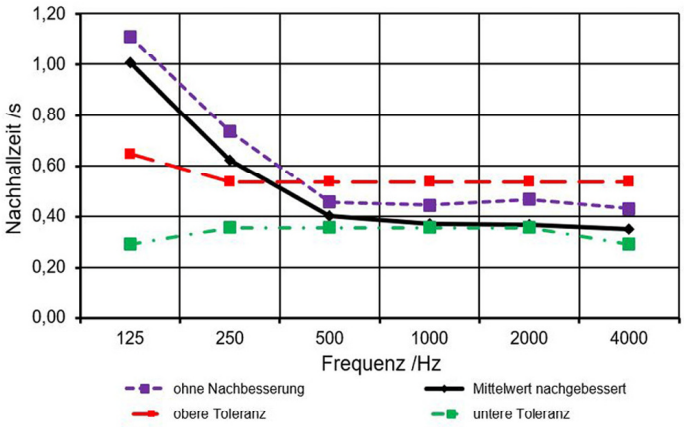

Abbildung 4: Klassenräume mit HWL-Platten auf Lattung und mit Ergänzung aus 40 mm Melamin-Schaum; auch die ergänzten Räume werden beanstandet, Wandpaneele sind nicht vorhanden

Gleichung[1] für einen Klassenraum, der für die integrative Beschulung eines Kindes mit Hörschädigung nachgerüstet werden sollte. Die betreuende Lehrerin vom mobilen Dienst einer Förderschule hatte die Verlegung eines Teppichbodens vorgeschlagen. Im Hinblick auf die Störgeräuschminderung ist das unbedingt sinnvoll, hat aber nur wenig Auswirkung auf die Nachhallzeit. Den vorgefundenen Zustand zeigt die obere schwarze Kurve, die rote darunter die rechnerisch zu erwartende Nachhallzeit nach Verlegung eines Teppichbodens.

Was soll denn dann das Rückwand-Paneel?

Würde man zusätzlich die Decke austauschen, so ergäbe sich ein Nachhallzeit-Verlauf entsprechend der zweituntersten Kurve in Abbildung 5 und nach zusätzlichem Einbau eines Wandpaneels nur noch eine ganz geringfügige Verbesserung bis zur untersten Kurve. Das ist bei dem rechnerischen Verfahren nach Sabine auch deshalb nicht verwunderlich, weil die Fläche des Rückwand-Paneels mit etwa 6,5 m² nur 10 % der Deckenfläche von etwa 65 m² umfasst. Aufgrund der Ergebnisse dieses einfachen Rechenverfahrens wird häufig behauptet, ein Rückwand-Paneel „bringe doch nichts", insbesondere die zu langen Nachhallzeiten bei 125 Hz würden doch gar nicht beeinflusst. Die etwa 1.000 € je Klassenraum für ein Rückwand-Paneel werden deshalb oft als zu aufwendig abgelehnt. Die seit über 50 Jahren festgelegte zulässige Zeitverzögerung von 50 ms (sie wurde schon in der „ganz alten" DIN 18041 von 1968 benannt) werde vom Rückwand-Echo auch nicht überschritten. Dieser Argumentation muss deutlich widersprochen werden, denn unsere Ohren können mehr, als wir messen können/wollen.

Den frühen Reflexionen auf der Spur

Von Kollegen, deren Messapparaturen jeweils T_{20}[2] und EDT[3] parallel auswerten, wurden einige Messergebnisse aus Räumen ohne Wandpaneel und aus anderen Räumen mit Wandpaneel zur Verfügung gestellt. (Leider ist der Stichprobenumfang noch sehr gering.) Dabei zeigte sich entsprechend Abbildung 6, dass in Räumen ohne schallabsorbierendes Wandpaneel die EDT (geringfügig) länger ist als T20, dass aber nach Abbildung 7 in anderen Schulen/Klassen mit Wandpaneel die EDT kürzer ist als T20 und damit den üblichen Verhältnissen bei „durchhängenden Nachhallkurven" entspricht. Dies ist nicht mehr als ein Hinweis, weil die genaue Hallfeld-Feinstruktur mit diesen Apparaturen nicht gemessen werden kann. Aber es lohnt sich zumindest, darüber einmal nachzudenken.

Die Nachhallzeit-Mittelwerte in den Klassenräumen mit Wandpaneelen sind zwar deutlich kürzer als in den Klassenräumen ohne. Das ist aber nicht (nur) auf die schallabsorbierenden Wandpaneele zurückzuführen, Vielmehr fanden diese Messungen in völlig unterschiedlichen Schulen mit unterschiedlichen Ausstattungen statt. Wichtig ist in dem hier beschriebenen Zusammenhang lediglich das Verhältnis zwischen EDT und T_{20}.

Hinweise aus DIN 18041

Schon in DIN 18041:2004 hieß es im Kapitel 5.2.1.2. 2:

Hat der betrachtete Raum einen rechtwinkligen Grundriss und sind die Wände eben und nicht durch Möbel, Regale ... gegliedert, besteht bei einer vollständig schallabsorbierend bekleideten Decke die Gefahr, dass Flatterechos auftreten. Da bei Räumen mit einem Volumen bis ca. 250 m³ keine Gefahr der akustischen Überdämpfung besteht, kann hier eine vollflächig schallabsorbierende Decke in Kombination mit einer ebenfalls schallabsorbierenden Rückwand eingesetzt werden.

[1] Wallace Clement Sabine (1868-1919) schuf in der Zeit von 1910 bis 1915 die Grundlagen der Raumakustik und die nach ihm benannte Sabinesche Nachhallzeit-Gleichung T = 0,163 s/m · V/A.

[2] T_{20} kennzeichnet die Nachhallzeit, die über einen Pegelabfall von nur 20 dB (gegenüber dem stationären Rauschsignal von -5 dB bis -25 dB) ermittelt und durch Multiplikation mit 3 auf einen Pegelabfall von 60 dB (T_{60} = RT = Reverberation-Time) extrapoliert wird.

3 EDT (Early-Decay-Time) betrachtet ausschließlich den Beginn des Pegelabfalls von 0 dB bis -10 dB, konzentriert sich also auf das, was direkt nach dem ursprünglichen Schallsignal folgt.

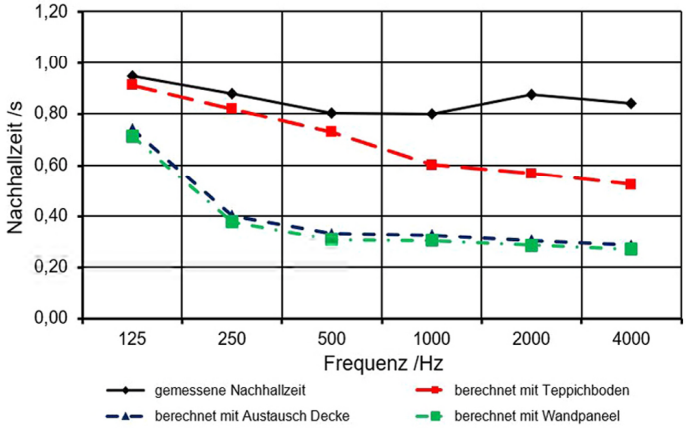

Abbildung 5: Klassenraum gemessen im vorgefundenen Zustand sowie berechnet mit Teppich, mit absorbierender Decke und mit Wandpaneel

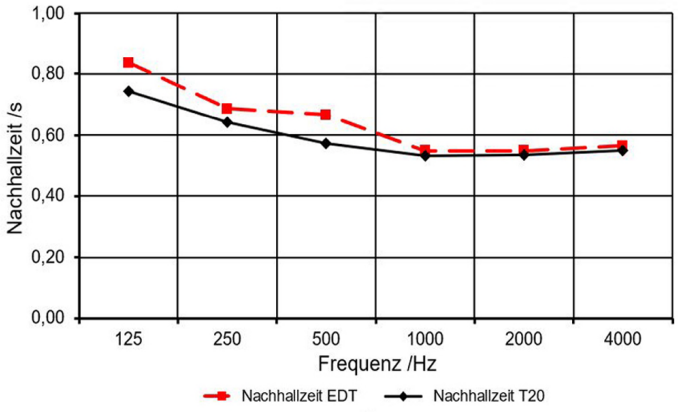

Abbildung 6: Mittelwerte von etlichen Klassenräumen ohne Wandpaneele → EDT (rot-gestrichelt) ist länger als T20 (schwarz-durchgezogen)

DIN 18041:2016 enthält im Kapitel 5.4 folgende Ergänzung:

In Räumen mit einer Länge von mehr als etwa 9 m können von der Rückwand direkt oder über Winkelspiegel-Reflexionen langverzögerte Schallanteile in den vorderen Raumbereich gelenkt werden, die zu einer Minderung der Sprachverständlichkeit führen. In diesem Fall müssen die Reflexionsflächen entweder schallabsorbierend bekleidet oder so geneigt werden, dass der auftreffende Schall als nützliche Verstärkung zu den von der Schallquelle entfernteren Hörern hin reflektiert wird. Auch stark gegliederte schallstreuende Oberflächen (zum Beispiel Bücherregale) sind zweckmäßig.

Woher kommen die „mehr als 9 m“?

Bei einer Klassenraum-Länge von 10 m läuft der Schall vom Mund des Lehrers bis zur Rückwand etwa 9 m und von dort zum vorne sitzenden Schüler noch einmal etwa 8 m. Daraus ergibt sich ein Schall-Umweg von knapp 17 m gegenüber der Direktschall-Einwirkung beim Schüler und die Zeitverzögerung des reflektierten Signals beträgt etwa 50 ms. Längere Zeitverzögerungen sind aber bereits seit der ersten Norm-Fassung von 1968 „verboten“. Deshalb schlägt die Norm spätestens bei so langen Räumen den Einbau von schallabsorbierenden Wandpaneelen vor. Andere Länder lassen als Zeitverzögerung gegenüber dem Direktsignal nur 35 ms zu. Mit diesem Wert müssten in Deutschland sämtliche Standard-Klassenräume, die üblicherweise Grundflächen von 8 m mal 8 m haben, mit schallabsorbierenden Wandpaneelen ausgestattet werden.

Sind unsere Ohren schneller?

1. Der sächsische Orgelbauer Gottfried Silbermann (1683 bis 1753) soll nach der Überlieferung bei der Akquise für einen Orgel-Neubau jeweils in der entsprechenden Kirche an etlichen Stellen mit seinem Spazierstock auf den Boden „getackert“ haben. Mit der Metallspitze gab das jedes Mal einen lauten und scharfen Impuls. Danach habe er entschieden, wo die Orgel aufgestellt wird. Immer wieder wird behauptet, er habe mit diesem Impuls den Nachhall angeregt. Das hat er damit zwar auch getan. Aber der Nachhall ist eher eine maßgebliche Größe für die Orgel-Disposition, nicht für den Standort. Silbermann hatte, wie viele gute Orgel-Intonateure, ein extrem gutes und vor allem schnelles Gehör. Für die Intonation ist der Einschwingvorgang jeder einzelnen Pfeife wichtig. Der dauert nur wenige hundertstel Sekunden. Und in einem ähnlich kurzen Zeitraum kamen (noch vor dem Einsetzen des Nachhalls) die ersten Schallreflexionen aus der Kirche an sein Ohr. Solche Reflexionen sind ganz wichtig für das „Aussprechen“ der Pfeifen und ihre Schallabstrahlung in den Raum. Und die sind – für entsprechend geübte Ohren – eben nur dann wahrnehmbar, wenn die Schallimpulse nicht nur laut sondern auch extrem kurz sind.

   Wer nicht so gute Ohren hat, nimmt solche Reflexionen zwar nicht bewusst wahr, In Klassenräumen (und an vielen anderen Stellen) stören sie aber trotzdem.

2. Judit Angster, Tochter des ungarischen Orgelbauers Jozsef Angster hat auf der DAGA 1990 in Wien vorgetragen[4], wie ihre Schallmessungen während des Einschwing-Vorgangs bei der Intonation einer Salizional-Orgelpfeife jeweils von ihrem Vater gehörmäßig wahrgenommen und kommentiert wurden. Abbildung 8 zeigt die ersten 10 Teiltöne (Grundton und 9 Obertöne) der Obertonreihe dieser Orgelpfeife. Man kann erkennen, dass nach etwa 30 ms der Einschwingvorgang beendet ist, selbst beim Grundton dauert er nicht länger als 40 ms. Jozsef Angster konnte genau beschreiben, was in dieser Zeit passiert.

3. Schallquellen-Lokalisation: Auch für ungeübte Ohren gibt es ein Beispiel, welches jeder nachvollziehen kann. Bei der Lokalisation von Schallquellen kann man in der Horizontal-Ebene Abweichungen von 5° gegen vorne feststellen. Für diesen Winkel betragen

[4] Judit Angster, Jozsef Angster, András Miklos: Analyse und subjektive Beurteilung des Tones labialer Orgelpfeifen während des Intonationsprozesses, Fortschritte der Akustik 1990 (Wien), Seiten 545–548

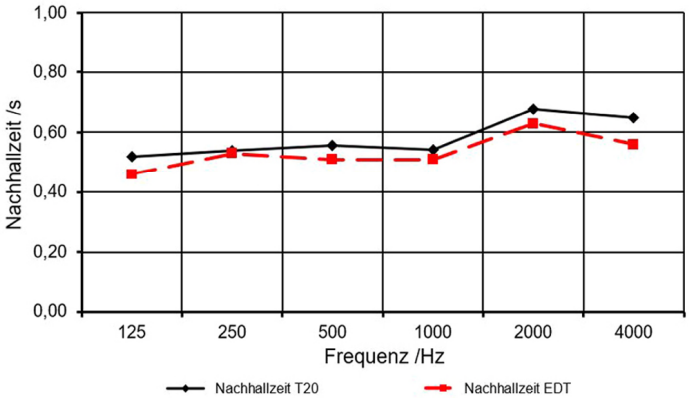

Abbildung 7: Mittelwerte von mehreren Klassenräumen mit Wandpaneelen → EDT (rot-gestrichelt) ist kürzer als T_{20} (schwarz-durchgezogen)

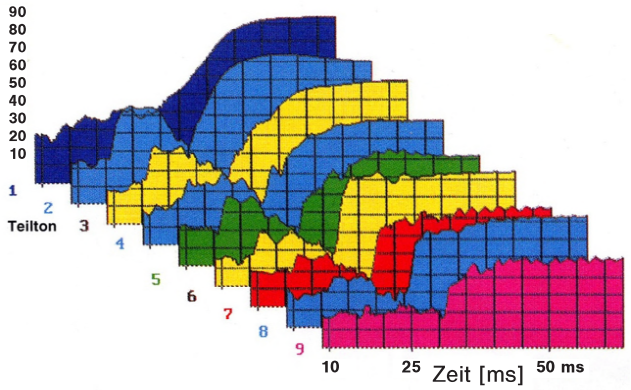

Abbildung 8: Der Einschwingvorgang einer Salizional-Orgelpfeife ist nach 40 ms abgeschlossen

die Laufstrecken-Unterschiede zu den beiden Ohren nicht 17 m, sondern nur 17 mm. Entsprechend betragen die Laufzeit-Unterschiede zwischen den beiden Ohren nicht 50 ms, sondern nur 50 µs! Unsere Ohren (auch musikalisch nicht so geübte wie bei Orgelbauern) arbeiten also viel schneller, als wir Raumakustiker glauben. Dasselbe wird (wahrscheinlich) auch für ein Direkt-Signal von vorne und ein Echo von hinten gelten. Das bedeutet aber, dass die Feinstruktur des Schallfeldes, welche für das Spracherkennen unbedingt wichtig ist, durch solche Artefakte beeinträchtigt wird. Und das gilt wie die vielfältigen Äußerungen der Lehrerschaft zeigen nicht nur für hörgeschädigte, sondern auch für guthörende Menschen.

Abbildung 9: Gut erkennbare Struktur

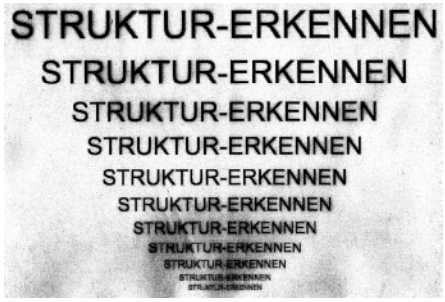

Abbildung 10: Schon geringe Störungen machen die Struktur unscharf und schlecht erkennbar. Diese Beeinträchtigung wird insbesondere dann auffällig, wenn es um Feinheiten geht. Grobe Strukturen sind dagegen noch ausreichend klar.

Abbildung 11: Bei Darstellung ausschließlich der feinen Konturen ist der gesamte Inhalt erkennbar.

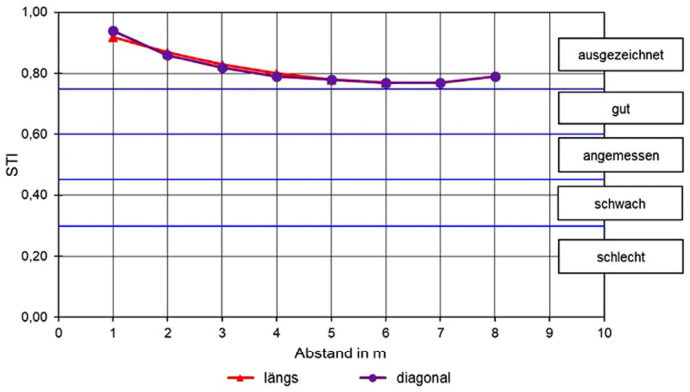

Abbildung 12: Der Sprachübertragungsindex STI sinkt auch in der Raumdiagonalen bis 8 m nicht unter STI = 0,76

Welche Beeinträchtigungen sich beim Erkennen feiner Strukturen durch Artefakte ergeben können, sollen die Abbildungen 9 bis 11 optisch verdeutlichen:

Kochrezept

Das „Kochrezept" für eine gute Klassenraum-Akustik ist so einfach, wie es alt (alt-bewährt) ist. Man muss lediglich den „raumakustischen Dreiklang" beachten:

1. Möglichst zuerst die ganze Decke hochgradig schallabsorbierend bekleiden. Sie ist die größte Fläche im Raum und liegt außerhalb der Handreichweite. Man kann also kostengünstig ein weiches, gut absorbierendes Material verwenden.
2. Unbedingt die zweite Raumdimension auch behandeln (zur Raum-Höhe auch die Raum-Länge): dazu schallabsorbierende Wandpaneele an der Klassenraum-Rückwand anbringen.
3. Ein Teppichboden absorbiert viel weniger, lässt aber viele Störgeräusche gar nicht erst entstehen.

In einigen nach diesen Vorgaben ausgestatteten Klassenräumen wurde der Sprachübertragungsindex gemessen. Nicht nur bei der Messung in Raum-Längsrichtung bis 6 m, sondern auch bei dem größten Abstand von 8 m diagonal durch den Klassenraum sinkt er nicht unter STI = 0,76 ab!

Die Berechnung nach W. C. Sabine stimmt nicht

Anders, als die einfachen raumakustischen Berechnungen nach der Sabineschen Nachhall-Gleichung es hergeben, kann die schallabsorbierende Wirkung von Wandpaneelen deutlich größer sein. In einem besonders eklatanten Fall wurde die Nachhallzeit durch eine passende Anbringung von 0,78 s auf 0,35 s reduziert. Berechnet man für diesen Fall „rückwärts" den Schallabsorptionsgrad dieses Paneels, so müsste er nicht bei 0,9 liegen, sondern bei 2,0. Das Paneel müsste also die doppelte Menge der auftreffenden Schallenergie schlucken. Das ist natürlich physikalischer Unsinn, zeigt aber die eklatante Wirkung sinnvoll platzierter Absorber.

Fazit

Wandpaneele sind viel wirksamer als man glaubt! Ihr Einbau lohnt sich immer!

Als am 14. Januar 2015 beim Deutschen Institut für Normung (DIN) in Berlin der Normentwurf DIN 18041 vor der Öffentlichkeit vorgestellt wurde, hat der Ausschussvorsitzende, Christian Nocke, es so formuliert:

In der Klassenraum-Akustik gibt es kein Erkenntnisproblem, sondern nur ein Umsetzungsproblem.

Autor:
Carsten Ruhe
hörgerecht planen und bauen
Rethwisch 10 · 25497 Prisdorf
E-Mail: carsten.ruhe@hoeren-und-bauen.de