

Untersuchungen zur Anordnung schallabsorbierender Oberflächen in Klassenräumen

Eckard Mommertz, Kati Drescher*, Gunter Engel
Müller-BBM GmbH, Planegg *HTW Mittweida

1 Einleitung

Die akustischen Gegebenheiten in Schulen und Klassenräumen sind seit geraumer Zeit Gegenstand umfangreicher Untersuchungen im In- und Ausland. Dies betrifft sowohl die Erfassung der akustischen Situation in bestehenden Schulen und ihres Einflusses auf die Leistungsfähigkeit aber auch die Überarbeitung der an Klassenräume zu stellenden akustischen Anforderungen (siehe z.B. [1]). Wichtigste Kriterien sind in diesem Zusammenhang ein ausreichend niedriger Störgeräuschpegel sowie eine angemessen niedrige Nachhallzeit. Während bislang für Klassenräume mit Raumvolumina zwischen etwa 125 m³ und 250 m³ Nachhallzeiten von 0,6 s bis 0,7 s ($\pm 20\%$) als günstig galten [2], werden heute im Idealfall Werte zwischen etwa 0,4 s und 0,6 s angestrebt [3]. In bestimmten Situationen werden teils sogar noch kürzere Nachhallzeiten von 0,1 bis 0,3 s als optimal bezeichnet [1,4].

Vor dem Hintergrund der baulichen Umsetzung muss man sich jedoch die Frage stellen, ob bzw. wann Nachhallzeiten im Bereich von 0,4 s tatsächlich erforderlich sind und wie diese praktisch erreicht werden können. Soll zudem zur Verbesserung der Reflexionsverteilung ein mittlerer reflektierender Deckenspiegel ausgeführt werden, so führt dies zwangsläufig zu umfangreichen absorbierenden Maßnahmen im Wandbereich. In der Regel stehen einer derartigen akustischen Auslegung jedoch gestalterische, wirtschaftliche aber insbesondere auch funktionale Aspekte entgegen. Zu letzteren zählen beispielsweise Anforderungen an die mechanische Belastbarkeit von absorbierenden Verkleidungen im Wandbereich aber auch die Reduzierung der thermischen Speichermassen bei der absorbierenden Verkleidung von Massivbauteilen.

Vor den genannten Hintergründen wird hier der Frage nachgegangen, welche Rolle die räumliche Verteilung von reflektierenden und absorbierenden Oberflächen in Klassenräumen spielt. Ebenfalls sollen Aussagen darüber getroffen werden, ob sehr kurze Nachhallzeiten tatsächlich notwendig sind. Die Untersuchungen erfolgten mit Hilfe von Computersimulationen für einen exemplarischen Klassenraum sowie mittels Hörversuchen mit auralisierten Schallfeldern.

2 Vorgehensweise

2.1 Raummodellierung

Für die Untersuchungen diente ein exemplarischer Klassenraum mit den Abmessungen 7,1 m x 10 m x 3,4 m = 240 m³ und etwa 30 Plätzen als Vorlage. Für diesen wurde ein akustisches Computermodell erstellt, welches in Abb. 1 gezeigt ist. Den einzelnen Oberflächen wurden frequenzabhängige Absorptions- und Streugrade zugewiesen, die auf Literatur- bzw. Erfahrungswerten beruhen und zusätzlich durch den Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen für den raumakustisch unbehandelten, unbesetzten Raum angepasst wurden. Insbesondere wurden den Wandflächen frequenzunabhängig ein Streugrad von $\delta = 0,2$, der Decke und dem Boden $\delta = 0,1$ zugewiesen.

2.2 Berechnungsgrößen und -methode

Für den Modellraum wurden mit dem Simulationsprogramm CATT v7.2 für jeweils neun Empfangspositionen und eine Quellenposition Raumimpulsantworten ermittelt und hinsichtlich der folgenden Kriterien ausgewertet:

- Sprachübertragungsindex *STI*
- Nachhallzeit T_{15} , zusätzlich auch *EDT*
- Deutlichkeitsgrad *D*

Als maßgebliche Größe zur Charakterisierung der Sprachverständlichkeit wurde hier der *STI* herangezogen. Jedoch las-

sen sich nach Untersuchungen von Bradley [5] aus dem *STI* auch andere die Sprachverständlichkeit beschreibende Größen wie z.B. der A_{cons} mit guter Genauigkeit ableiten.

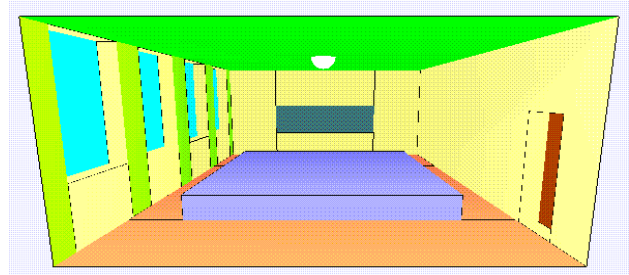
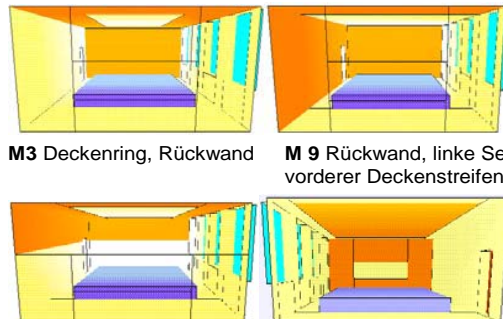


Abb. 1. Computermodell des exemplarischen Klassenraums.

Ergebnisse von Vorversuchen haben gezeigt, dass es auch für die Bestimmung des *STI* sinnvoll ist, keine Sprecherrichtcharakteristik sondern eine ungerichtet abstrahlende Quelle zu modellieren.

2.3 Untersuchte Raumzustände

Die im Modell absorbierend gestaltete Fläche betrug immer 71 m² (Deckenfläche); variiert wurde die Anordnung im Raum sowie der Schallabsorptionsgrad. Letzterer wurde so angepasst, dass die Sabine'schen Nachhallzeiten für den besetzten Modellraum frequenzunabhängig $T_{\text{Sabine}} = 0,4; 0,5; 0,6$ und 0,8 s betragen. Eine Auswahl von den insgesamt 13 untersuchten Absorberanordnungen ist in Abb. 2 gezeigt. Bei der Anordnung M0 (nicht dargestellt) wurde ausschließlich die Deckenfläche verkleidet.



M3 Deckenring, Rückwand

M9 Rückwand, linke Seitenwand
vorderer Deckenstreifen

M11 Deckenring,
Streifen an drei Wänden

M13 mittleres Deckenfeld,
Stirnwand (ohne Tafel)

Abb. 2. Auswahl aus den 13 untersuchten Anordnungen der absorbierenden Flächen.

3 Simulationsergebnisse

Die aus den Impulsantworten ermittelten *STI*-Werte sind in Abb. 3 zusammengefasst. Es handelt sich dabei um die Mittelwerte für die neun Empfangspositionen.

Es ist zu erkennen, dass für Sabine'sche Nachhallzeiten $T_{\text{Sabine}} \geq 0,6$ s der *STI* unter den getroffenen Modellannahmen kaum von der Verteilung der absorbierenden Flächen abhängt. Erst für eine höhere Raumbedämpfung zeichnen sich zunehmende Unterschiede ab. Dabei überrascht es nicht, dass eine vollständig absorbierende Deckenverkleidung (M0) bei gleicher äquivalenter Absorptionsfläche am ungünstigsten abschneidet. Die nach [2] ungünstige Anordnung eines absorbierenden mittleren Deckenbereichs und einer absorbierenden Stirnwand (M13) liefert hingegen höhere *STI*-Werte als die Anordnung M11 mit reflektierendem Deckenspiegel und absorbierendem Wandstreifen. Am besten im Sinne ei-

nes hohen *STI* fällt die wenig praxisnahe Anordnung 9 aus, bei der eine Seitenwand, die Rückwand sowie der vordere Deckenbereich absorbierend gestaltet ist. Ursache ist, dass jeweils eine der gegenüberliegenden parallelen Flächen absorbierend ausgebildet ist.

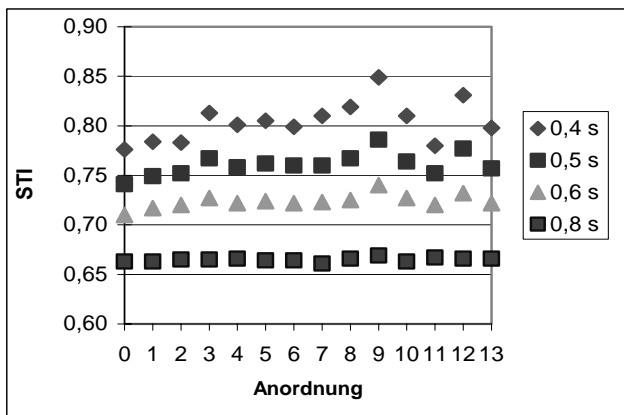


Abb. 3. Berechneter *STI* in Abhängigkeit von der Anordnung der absorbierenden Oberflächen. Für einen *STI* größer als 0,75 gilt die Sprachverständlichkeit bereits als sehr gut. Parameter ist die Sabine'sche Nachhallzeit.

Aus Abbildung 3 lässt sich aber auch ableiten, dass sich ein geringer *STI* bei einer ungünstigeren Verteilung der absorbierenden Flächen durch eine Erhöhung der äquivalenten Absorptionsfläche - also durch Absenkung der Sabin'schen Nachhallzeit - mehr als wettmachen lässt.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse zeigte weiter, dass zwischen *STI* und Deutlichkeitsgrad aber auch zwischen *STI* und T_{15} und zwischen *STI* und *EDT* eine hohe Korrelation besteht, die in dem betrachteten Nachhallzeitenbereich von 0,3 s bis 0,8 s näherungsweise über einen linearen Zusammenhang beschrieben werden kann (Abb. 4).

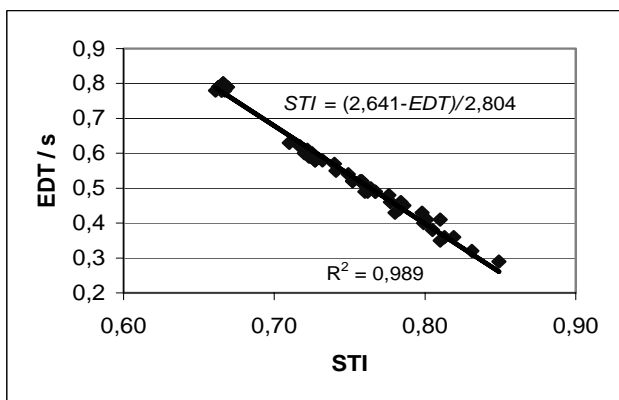


Abb. 4. Zusammenhang zwischen *STI* und *EDT* für den untersuchten Modellraum

4 Hörversuche

Um Aussagen über die subjektive Wirkung der unterschiedlichen Raumzustände zu erhalten, wurden mit Hilfe des o.g. Programms binaurale Raumimpulsantworten für drei Empfängerpositionen (vorne, Mitte, hinten) für die folgenden Zustände berechnet:

Versuchsreihe 1: für M0 mit $T_{Sab} = 0,4; 0,5; 0,6$ s sowie für den Raum ohne Maßnahmen. Die berechneten Nachhallzeiten liegen hier bei *EDT* = 0,48; 0,55; 0,63 und 1,1 s.

Versuchsreihe 2: $T_{Sab} = 0,4$ für M0, 3, 9, 11. Die simulierten frühen Nachhallzeiten sind *EDT* = 0,48; 0,36; 0,29 und 0,45 s.

Die simulierten Raumimpulsantworten wurden mit einem nachhallfrei aufgezeichneten Sprachbeispiel (Mathematikunterricht) gefaltet und auf einem digitalen Schnittplatz aufbereitet. Die Hörversuche erfolgten mit 11 Probanden über Kopfhörer. Es wurde gefragt, welche akustische Umgebung

für den Unterricht bevorzugt wird. Zu beurteilen waren die o.g. unterschiedlichen Raumzustände für ein und denselben Platz im vollständigen Paarvergleich. Die Probanden hatten die Möglichkeit, beliebig oft zwischen den dargebotenen Paaren hin- und her zuschalten

Die Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Für die Versuchsreihe 1 wurde für alle drei Sitzplätze die jeweils kürzere Nachhallzeit bevorzugt. Für die Versuchsreihe 2 hingegen zeigte sich ein differenzierteres Bild. Etwa die Hälfte der Probanden waren der Ansicht, dass die Anordnungen M 03 und M 09 insbesondere für den vorderen Platz zu nachhallarm sind und einen Raumeindruck vermissen lassen. Über die Empfängerplätze gemittelt wurde die Anordnung M3 (*EDT* = 0,36 s) der Anordnung M9 vorgezogen (*EDT*=0,29 s).

5 Weitergehende Folgerungen

Bislang wurde der Einfluss von Störgeräuschen auf die Sprachverständlichkeit nicht betrachtet. Jedoch kann argumentiert werden, dass von außen eindringende Störgeräusche wie Verkehrslärm, ggf. Geräusche durch haustechnische Anlagen oder auch Nutzergeräusche aus benachbarten Räumen durch schallabsorbierende Maßnahmen im Raum im gleichen Maße reduziert werden, wie dies für den Sprachpegel des Lehrers der Fall ist. Hinzu kommt, dass, wie eingangs erwähnt, bei einem stärker bedämpften Raum eine geringere Geräuschentwicklung durch die Kinder zu erwarten ist. Auch dies rechtfertigt also die Forderung nach möglichst kurzen Nachhallzeiten. Jedoch deuten o.g. Hörversuche auch darauf hin, dass Räume mit sehr kurze Nachhallzeiten im Bereich von 0,3 s bereits als unnatürlich empfunden werden können.

Für Klassenräume mit konventionellen Geometrien und Größen lässt sich folgendes festlegen:

- Die hier beschriebenen Ergebnisse decken sich mit den Empfehlungen der ASA-Publikation über Klassenräume [3], nach denen geringe Nachhallzeiten von 0,4 – 0,6 s ideal sind.
- Nach unseren Erfahrungen sind jedoch insbesondere für weiterführende Schulen Nachhallzeiten von 0,6 s – 0,7 s weiterhin gut geeignet sein. Auch dies erfordert bauliche schallabsorbierende Maßnahmen
- Die räumliche Verteilung von schallabsorbierenden Maßnahmen bietet aus akustischer Sicht eine große Gestaltungsfreiheit. Durch eine geeignete Verteilung der absorbierenden Maßnahmen lässt sich die Wirksamkeit erhöhen. Bei einseitiger Verteilung, z.B. ausschließlicher absorbierender Verkleidung der Decke, ist besonders darauf zu achten, dass keine störenden Flatterechos zwischen zueinander parallelen Wandflächen auftreten.

Die genannten Nachhallzeiten sind Zielgrößen für den besetzten Zustand. Sie sollten möglichst in einem Toleranzbereich von $\pm 20\%$ für den gesamten raumakustischen Frequenzbereich eingehalten werden.

6 Literatur

- [1] Schick A, Klatte M, Meis M (1999) Die Lärmbelastung von Lehrern und Schülern – ein Forschungsstandbericht. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 46 (5), 77-87
- [2] DIN 18041 (1968) Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen
- [3] Classroom Acoustics (2000) Acoustical Society of America
- [4] Bistafa S R, Bradley J S (2000) Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics. J. Acoust. Soc. Am. 107 (2), 861-875
- [5] Bradley J S (1998) Relationship among measures of speech intelligibility in rooms. J Acoust. Soc. Am. 46 (1998) 396-405
- [6] Eßmann H (1973) Der Einfluß raumakustischer Verhältnisse in Unterrichtsräumen auf den Leistungserfolg bei Schülern. Wiss. Z. Univers. Dresden 22 H 1, 201-209