

Akustik von Schulzimmern und Auditorien

Kurt Eggenschwiler

Empa Materials Science & Technology, Abteilung Akustik, CH-8600 Dübendorf

www.empa.ch/akustik

1. Einleitung

Die Akustik in Schulzimmern ist seit einiger Zeit in pädagogischen und akustischen Kreisen ein stark beachtetes Thema (siehe z. B. [1] - [6]). Wer sich mit offenen Ohren in Schulzimmern und Auditorien umhört wird dies verstehen. Eigentlich ist es erstaunlich, wie oft wir schlechte akustische Verhältnisse in solchen Räumen antreffen. AkustikerInnen sind enttäuscht, dass die seit Jahrzehnten bekannten Regeln der akustischen Gestaltung offenbar in der Praxis nicht umgesetzt werden. LehrerInnen sind frustriert, dass Schul- und Baubehörden zu oft die Prioritäten falsch setzen. Andere Faktoren als gute Sprachverständlichkeit und gute Hörsamkeit werden beim Entwurf von Räumen viel höher bewertet.

Unterdessen hatte sich gezeigt, dass die bisher vorhandenen Richtlinien verbessert werden mussten. Die Anforderungen an Räume für Sprache wurden strenger formuliert. Die grundsätzlichen Anforderungen für Schulzimmer und Auditorien sind

- Sehr gute Sprachverständlichkeit.
- Natürliche Übertragung der Sprachlaute.
- Möglichst wenig Lärm von ausserhalb und innerhalb des Gebäudes.
- Möglichst wenig Lärm im Raum selber.
- Gute Musikhörsamkeit in Schulzimmern.

In den folgenden Ausführungen werden die Anforderungen auf Grund der Bedürfnisse von Lernenden und Lehrenden detaillierter formuliert. Es werden Hinweise gegeben, welcher Art die Anforderungen sind, und wie sie umgesetzt werden können.

2. Wirkung von Lärm und schlechter Akustik in Schulzimmern

2.1 Stand der Forschung

Die Frage der Auswirkung von Lärm und schlechter Raumakustik auf das Lernen und Lehren wurde von der Forschung bisher eher stiefmütterlich behandelt. Es lassen sich jedoch einige Aspekte von Studien zur Lärm-Leistungs-Problematik auf die Schulsituation übertragen. Dies lässt den Schluss zu, dass die Lärmbelastung sich unmittelbar auf die mentale Leistung von Schülern und Lehrern auswirkt: Schlechteres Sprachverständnis, verringerte Aufmerksamkeit und Konzentration, aber auch eine labilere psychische Verfassung. Vor allem das Kurzzeitgedächtnis scheint zu leiden. Aber auch das soziale Klima wird schlechter, denn Lärm fördert Aggressionen. Es wird vermutet, dass lernschwache Kinder besonders beeinträchtigt werden.

An verschiedenen Orten werden zurzeit Studien durchgeführt, wie z. B. in Deutschland. Es wird versucht, die Zusammenhänge zu vertiefen und interdisziplinär zu untersuchen. Damit sollen Argumente für eine bessere Schulzimmerakustik wissenschaftlich untermauert werden. Dass dies notwendig ist, mag befremden, wo doch die Argumente praktisch auf der Hand liegen. Dies zeigt eine Studie der Heriot-Watt University in Edinburgh. Im folgenden Abschnitt wird von Resultaten aus der Studie berichtet.

2.2 Einige Ergebnisse der Studie der Heriot-Watt University [4]

In die Studie wurden über 70 Unterrichtsräume von Grundschulen in Schottland, England und Nordirland einbezogen. Die Untersuchungen wurden in unbesetzten und besetzten Schulzimmern, und in solchen *ohne* akustische Massnahmen ("unbehandelt") und *mit* akustischen Massnahmen ("behandelt") durchgeführt. Verschiedene akustische Messwerte wurden ermittelt, ein spezieller Wortverständlichkeitstest WIPI für Kinder eingesetzt und ein Fragebogen für die Lehrenden ausgewertet.

Die gemessene Sprachverständlichkeit (Speech Transmission Index STI) war in den unbehandelten Schulzimmern signifikant schlechter. Bei diesen Messungen wurden auch immer wieder besonders schlechte Plätze gefunden. Die WIPI-Tests mit den Kindern ergaben in den unbehandelten Schulzimmern ebenfalls signifikant schlechtere Werte (siehe Tabelle 1). Besonders gross war der Unterschied, wenn die anderen Kinder arbeiteten, und damit einen gewissen Lärmpegel im Raum verursachten. Die Nachhallzeiten der unbehandelten Schulzimmer lagen besetzt im Mittel bei 0.6 Sekunden, bei den akustisch behandelten bei 0.4 Sekunden. Die Streuung wurde in der Zusammenfassung der Studie leider nicht angegeben. Es gibt aber einen Hinweis, dass einige kleinere der unbehandelten Schulzimmer mit ihren tiefen Nachhallzeiten den Mittelwert stark drücken. Viele Werte lagen offenbar im Bereich 0.9-1.0 s.

Tabelle 1 Resultate des Wortverständlichkeitstests WIPI

	unbehandelt	behandelt
Kopfhörer	97 %	98 %
Ruhiger Klassenraum	94 %	98 %
andere Kinder arbeiten	57 %	67 %

Interessant war die Auswertung der Fragebogen für die Lehrenden:

- LehrerInnen die ihre Schulzimmer als laut bewerten
 - leiden eher unter Kopfschmerzen.
 - neigen eher dazu, Halsprobleme in Verbindung mit ihrer Arbeit zu sehen.
 - melden sich bei Halsproblemen eher krank.
- LehrerInnen die ihre Schulzimmern als zu hallig bewerten
 - glauben eher, dass die Akustik Einfluss auf die eigene Leistung hat.
 - glauben eher, dass die Akustik Einfluss auf die Leistung und das Verhalten der Kinder hat.
 - sind häufiger krank als ihre Kollegen.
- LehrerInnen in Schulzimmern mit Akustikdecken leiden seltener unter Problemen mit Stimme und Hals.

Insgesamt zeigt schon diese Studie alleine, dass bei der Gestaltung von Schulräumen der Akustik hohe Bedeutung zugemessen werden muss.

Weil die Frage der guten Sprachverständlichkeit eine grosse Rolle spielt, wird sie im nächsten Abschnitt gesondert behandelt.

3. Sprachverständlichkeit in Räumen

3.1 Einfluss von Störgeräuschen auf die Sprachverständlichkeit

Je mehr die Sprache durch Störgeräusche verdeckt wird, umso mehr reduziert sich die Sprachverständlichkeit, bis schliesslich die Sprache nicht mehr wahrnehmbar ist. Bei den Zuhörenden muss die Lautstärke der Sprache deshalb zu jener der Störgeräusche in einem vernünftigen Verhältnis stehen. Hörbehinderte Menschen benötigen einen grösseren Abstand der Sprache zum Störgeräusch. Ebenso verhält es sich beim Hören von Fremdsprachen.

3.2 Einfluss der Raumreflexionen und der Nachhallzeit

In Räumen trifft nicht nur direkter Schall von den Sprechenden bei den Zuhörenden ein. Das Sprachsignal wird an Boden, Wänden und Decke viele Male reflektiert und erreicht darauf zeitlich verzögert das Ohr. Erstaunlich, dass wir trotz dieser vielfach verzögerten und überlagerten Signale die Sprache trotzdem verstehen. Die eher wenig verzögerten Signale werden zu unserem Vorteil nutzbringend überlagert. Wenn die Signale aber zu stark verzögert sind, vermindern sie das Verständnis. Negativ wirken sich aus:

- Zu langer Nachhall.
- Starke Schallreflexionen welche später als 50 ms nach dem Direktschall eintreffen.
- Flatterechos, die z. B. durch wiederholte Reflexion von Schall an parallelen Wänden entstehen.

Der Nachhall setzt sich aus den vielen Schallanteilen zusammen, welche beim Ohr nach wiederholter Reflexion eintreffen. Wenn der Raum viele schallabsorbierende Materialien enthält, geht bei den Reflexionen an solchen Wandflächen viel Schallenergie verloren. Der Nachhall wird kurz. Im umgekehrten Fall - also bei Räumen mit überwiegend schallharten Flächen wie Beton, Glas etc. - entwickelt sich ein langer Nachhall.

3.3 Die Nachhallzeit

Der Nachhall wird durch die so genannte Nachhallzeit in Sekunden charakterisiert. Sie bezeichnet die Zeit welche nach dem Verstummen einer Schallquelle vergeht, bis der Schalldruck im Raum auf einen Tausendstel des Anfangswertes gesunken ist. Die Nachhallzeit ist in den verschiedenen Bereichen der Tonhöhe unterschiedlich.

Für die Nachhallzeit gibt es Vorschläge für optimale Werte, welche sich *für eine erste grobe Annäherung* gut eignen (Mittelwerte bei 500 Hz/1000 Hz):

Grosse Konzertsäle	etwa 2 Sekunden
Sprechtheater	etwa 1 Sekunde

Die Nachhallzeit ist ein pauschales Mass für den ganzen Raum. Sie eignet sich gut als erster Zielwert für die Gestaltung von Räumen. Das Erreichen des Wertes garantiert aber noch nicht, dass auf allen Plätzen im Publikum die gewünschten Verhältnisse erreicht werden.

3.4 Messung und Prognose der Sprachverständlichkeit

Die Sprachverständlichkeit kann natürlich durch Befragung von Versuchspersonen ermittelt werden. Diese Methode ist aber ausserordentlich aufwändig. Es gibt akustische Messmethoden, welche heute diesen Zweck ebenfalls gut erfüllen. Verbreitet ist die Messung des Speech Transmission Index STI.

4. Akustische Gestaltung von Schulzimmern und Auditorien

4.1 Stand des Wissens: DIN 18041, Hörsamkeit in kleinen und mittelgrossen Räumen

Aus den Erkenntnissen der beiden vorangehenden Abschnitte lassen sich klare Anforderungen herleiten:

- Die Lautstärke von Fremdgeräuschen muss begrenzt werden.
- Direktschall und starke frühe Schallreflexionen sollen gefördert, späte Raumreflexionen vermieden und der Nachhall kurz gehalten werden.

Besondere Anforderungen gelten für Hörbehinderte. [7] Zu berücksichtigen gilt es ferner, dass auch bei normalhörenden Kindern ein Anteil von vielleicht 20% z. B. durch eine Erkältung temporär ein etwas vermindertes Hörvermögen aufweist. [3] Nicht zuletzt spielt es eine Rolle, in welcher Sprache der Unterricht oder ein Vortrag stattfinden. Das Verstehen, und sicher auch das Lernen von Fremdsprachen erfordern höhere Anforderungen.

Auf Grund der weiter oben diskutierten neuen Erkenntnisse und der Anliegen der Hörbehinderten wurde in Deutschland eine Revision der DIN 18041 (Hörsamkeit in kleinen bis mittelgrossen Räumen) veranlasst. Die heute vorliegende Endfassung der DIN 18041 [8] dokumentiert den Stand des Wissens [9]. Schulzimmer und Auditorien sollen deshalb nach den Anforderungen der neuen DIN 18041 geplant oder saniert werden.

In der Schweiz wird die DIN 18041 von der schweizerischen Gesellschaft für Akustik SGA-SSA empfohlen [10] und die entsprechenden Anforderungen wurden in der kürzlich revidierten Schweizer Norm SIA 181 „Schallschutz“ im Hochbau aufgenommen. [11]

4.2 Vermeiden von Lärm

Normalhörende sind in Situationen ohne Nachhall in der Lage, Sprache auch dann noch (einigermassen) zu verstehen, wenn der Pegel der Störgeräusche 5 dB höher ist als das Sprachsignal. Für Hörbehinderte sollte der Pegel der Störgeräusche mindestens 15 dB *tiefer* sein. Da wir nicht beliebig laut sprechen können, resp. als Hörende auch nicht beliebige Lautstärken ertragen, darf das Störgeräusch eine gewisse Schwelle nicht überschreiten.

In der Norm DIN 18041 sind die Anforderungen zum zulässigen Störgeräusch nach Nutzungsarten in einer Tabelle wie folgt zusammengefasst:

Tabelle 2 Einstufung der zulässigen Störgeräuschpegel gemäss DIN 18041, Tabelle 1

Schalltechnische Anforderungen an die Raumnutzung	Störgeräuschpegel L_{NA} dB	Eignung ^a für eine Entfernung: Sprecher-Hörer		Eignung ^a für Personen mit Hörverlusten	Eignung ^a für die Wahrnehmung schwieriger oder fremdsprachiger Texte
		mittlere ^{b,c}	grössere ^b		
I (mindest)	≤ 40	+	-	-	-
II (mittlere)	≤ 35	+	o	o	o
III (hohe)	≤ 30	+	+	+	+

^a) "+" geeignet, "o" bedingt geeignet, "-" nicht geeignet
^b) Für eine mittlere Entfernung zwischen Sprecher und Hörer kann üblicherweise ein Abstand von 5 m bis 8 m, für grössere Entfernungen > 8 m, angenommen werden.
^c) Auch geeignet für geringere Entfernungen zwischen Sprecher und Hörer bis etwa 5 m.

Im Raum selber sind Lüftungsanlagen und Geräte wie Hellraumprojektoren und Video-beamer oft störende Lärmquellen. Sie müssen entsprechend den obigen Forderungen dimensioniert und evaluiert werden.

Für Geräusche von ausserhalb (z. B. Strassenlärm, Fluglärm) und von anderen Räumen des Gebäudes (z. B. Haustechnische Anlagen, andere Klassenräume, Treppenhaus) sind in der Schweiz die Anforderungen der SIA 181 Schallschutz im Hochbau [11] einzuhalten.

4.3 Kurze Nachhallzeit

In der DIN 18041 [8] sind nach dem Stand des Wissens die optimalen Nachhallzeiten für Schulzimmer und Auditorien festgelegt. In anderen Ländern wurden ähnliche Regelungen getroffen (siehe z. B. [12], [13], [14])

Für **Unterrichtsräume** werden in der DIN die folgenden Anforderungen gestellt. Der anzustrebende **Sollwert der Nachhallzeit T_{soll}** in Sekunden als Mittelwert der Oktavbänder 500 Hz und 1000 Hz wird abhängig vom Raumvolumen V in m^3 nach der folgenden Formel festgelegt:

$$T_{soll} = 0.32 \cdot \log(V) - 0.17$$

Der Zusammenhang ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die anzustrebende Frequenzabhängigkeit findet sich in Abbildung 2. Das Diagramm ist normiert auf T_{soll} .¹

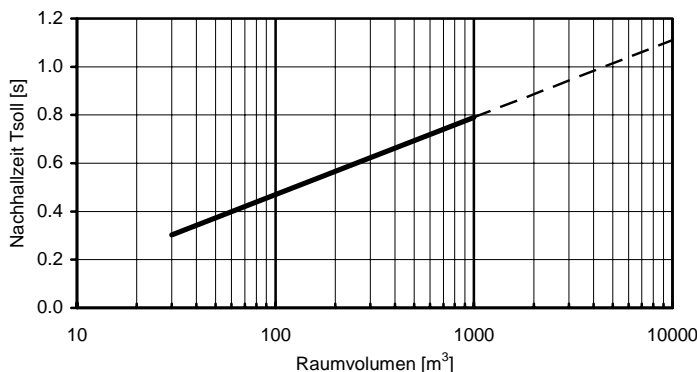


Abbildung 1

Sollwert T_{soll} der gemittelten Nachhallzeit zwischen 500 Hz und 1000 Hz im besetzten Zustand für Räume für Unterricht gemäss DIN 18041, Bild 1

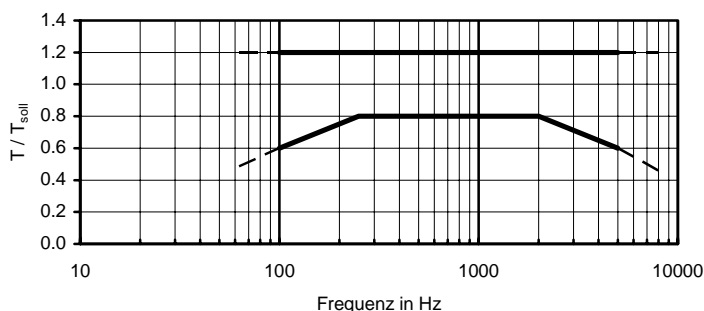


Abbildung 2

Toleranzbereich der empfohlenen Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Frequenz für Sprache gemäss DIN 18041, Bild 2

¹ LESBEISPIEL: Für einen Raum mit einem Volumen von $250 m^3$ kann aus dem Diagramm in Abbildung 1 eine Soll-Nachhallzeit T_{soll} von 0.6 Sekunden abgelesen werden. Aus dem Diagramm in Abbildung 2 ergibt sich, dass die Nachhallzeit in den Oktavbändern 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz und 2 kHz im Bereich von $T_{soll} \pm 20\%$ liegen sollte, also 0.48 - 0.79 Sekunden, In den Oktavbändern 125 Hz und 250 Hz im Bereich $T_{soll} - 40\% / T_{soll} + 20\%$ also 0.36 - 0.78 Sekunden

Im unbesetzten Raum sollte die Nachhallzeit im Allgemeinen nicht mehr als 0.2 s über dem Sollwert liegen. Dies ist vor allem auch in grossen Auditorien zu beachten, welche oft bei stark unterschiedlicher Besetzung genutzt werden.

Für Personen mit eingeschränktem Hörvermögen sollten nach heutigem Kenntnisstand die anzustrebende Nachhallzeit vorrangig für Räume mit einem Volumen bis zu 250 m³ und der Nutzung Sprache/Unterricht in den Oktavbändern 250 Hz bis 2000 Hz bis 20% unter den in Abbildung 1 angegebenen Kurven liegen. Abbildung 2 ist in diesem Frequenzbereich nicht anzuwenden. Vergleichbare Anforderungen gelten auch für die Kommunikation in einer Sprache, die nicht als Muttersprache gelernt wurde, bei der Kommunikation mit Personen, die Deutsch als Fremdsprache sprechen, und die Kommunikation mit Personen, die auf andere Weise ein Bedürfnis nach erhöhter Sprachverständlichkeit haben, z. B. Personen mit Sprach- oder Sprachverarbeitungsstörungen, Konzentrations- bzw. Aufmerksamkeitsstörungen, Leistungsschwäche.

Auch für **Sporthallen** sind in der DIN Norm Anforderungen für die Nachhallzeit festgelegt. Sie werden hier der Vollständigkeit halber ebenfalls erwähnt:

Für Sport- und Schwimmhallen mit einem Volumen von 2 000 ... 8 500 m³ ohne Publikum sind die Nachhallzeiten wie folgt definiert

$$\text{Sport 1: } T_{\text{soll}} = 1.27 \cdot \lg(V) - 2.49$$

$$\text{Sport 2: } T_{\text{soll}} = 0.95 \cdot \lg(V) - 1.74$$

Sport 1: für normale Nutzung und/oder einzügigen Unterrichtsbetrieb (eine Klasse/ Sportgruppe, einheitlicher Kommunikationsinhalt)

Sport 2: für mehrzügigen Unterrichtsbetrieb (mehrere Klassen/Sportgruppen parallel)

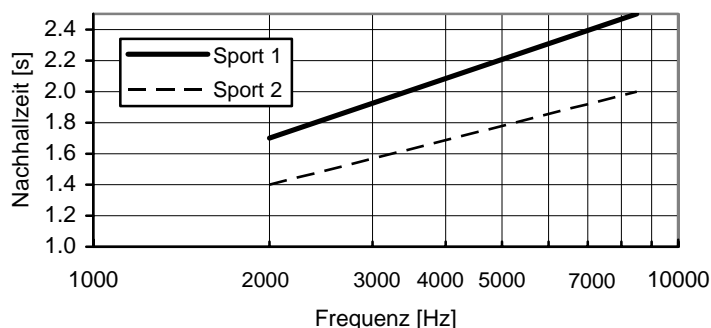


Abbildung 3

Nachhallzeit für Sporthallen gemäss DIN 18041, Bild 1

4.4 Gute Raumform

Mit einer akustisch guten Raumform kann der Schall richtig gelenkt werden, und es können negative Erscheinungen wie Echos und Flatterechos vermieden werden. Angaben zur richtigen Gestaltung finden sich in der DIN-Norm 18041 [8] und in Fachbüchern wie z. B. [15].

▪ Versorgung mit Direktschall - freie Sichtlinie

Um die wichtige Versorgung mit Direktschall sicher zu stellen, müssen die Kriterien für freie Sichtlinien auch für die Akustik angewendet werden. Dies bedeutet für grössere Auditorien ansteigende Publikumsflächen oder hoch gelegte Podien. Der Grundriss und die Anordnung des Publikums müssen je nach Nutzung so optimiert werden, dass die Direktverbindung zwischen Sprechenden und Hörenden möglichst kurz ist. Für die Hörbehinderten ist es zusätzlich ausserordentlich wichtig, dass die

Sicht für das Lippenlesen möglichst gut ist, gefördert übrigens mit einer geeigneten Beleuchtung.

- **Frühe Schallreflexionen fördern**

Frühe Schallreflexionen an der Decke oder an den Wänden sind zu fördern, weil sie die Sprachverständlichkeit verbessern und zu einer ausgeglicheneren Pegelverteilung im Raum führen. Frühe Schallreflexionen sind Reflexionen, die bei den Hörenden bezüglich des Direktschalls mit maximal 50ms Verzögerung eintreffen (50ms = 50 Tausendstel Sekunden). Dies entspricht einem maximalen Umweg des Schalls von 17m. (siehe Abbildung 4)

- **Späte Schallreflexionen dämpfen**

Späte Schallreflexionen (50 ms nach dem Direktschall), welche vor allem in mittleren und grösseren Auditorien auftreten können, beeinträchtigen die Sprachverständlichkeit. Sie werden als Nachhall, als Echo oder sogar als Flatterechos wahrgenommen. Die späten Schallreflexionen sollen deshalb möglichst gedämpft oder ganz vermieden werden.

- **Echos und Flatterechos vermeiden**

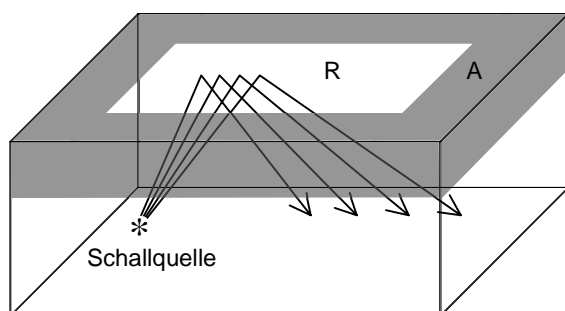
Echos und Flatterechos können mit geometrischen Mitteln im Planungsstadium eruiert und damit vermieden werden. Massnahmen: Ebene Parallele Wände vermeiden, geometrisch richtige Lenkung des Schalls, Einsatz von Schallabsorption am richtigen Ort.

Die Rückwand sollte schallabsorbierend gestaltet sein, ausser es sei sichergestellt, dass keine Reflexionen zu den Sprechenden zurück geworfen werden. Konkave Flächen müssen besonders gut überprüft werden.

Die Untersuchungen mit den Mitteln der geometrischen Akustik sind nicht nur für die Sprecherstandorte durchzuführen, sondern auch für die künstlichen Schallquellen, also die Lautsprecher, welche in mittleren und grösseren Auditorien für die Sprachbeschallung eingesetzt werden.

- **Richtige Anordnung der Schallabsorber**

Die wegen der Forderung nach einer kurzen Nachhallzeit notwendigen Flächen mit Schallabsorption sind im Idealfall so im Raum zu verteilen, dass nützliche Reflexionen nicht verhindert werden: Schematisch ist die Anordnung in Abbildung 4 gezeigt. Weitere Beispiele finden sich in der DIN 18049 [8]. Für Unterrichtszimmer ist allerdings zu erwähnen, dass das Erreichen der optimalen Nachhallzeit Priorität hat [16].



*Abbildung 4
Möglichkeit der Anordnung reflektierender (R) und absorbierender (A) Flächen in einem Schulzimmer. Die reflektierende Fläche spiegelt nützlichen Schall in den hinteren Bereich des Raumes.*

4.5 Vorgehen bei der Planung

Bei der Planung sollte frühzeitig eine akustische Beratung beigezogen werden. So können Form und Material überprüft und optimiert werden. AkustikerInnen mit dem Diplom "dipl. Akustiker SGA" haben eine Prüfung der Schweizerischen Gesellschaft für Akustik SGA bestanden.² Die Nachhallzeit kann bei einfachen Räumen mit der bekannten Formel von Sabine berechnet werden (siehe z.B. [8], [15], [17]). Für grössere Räume ist eine Computersimulation sinnvoll [18].

4.6 Beschallung

In mittleren und grösseren Auditorien werden zur Unterstützung Beschallungsanlagen eingesetzt [19], . Leider werden dabei oft die anerkannten Regeln der Technik verletzt, so dass nicht selten sogar eine Verminderung der Sprachverständlichkeit beim Betrieb der Anlagen festzustellen ist.

Eine Arbeitsgruppe der Schweizerischen Gesellschaft für Akustik SGA hat Empfehlungen für Architekten und Bauherrschaften für Beschallungsanlagen verfasst [21]. Die Richtlinie beschreibt die Funktion von Sprachbeschallungsanlagen, erklärt verschiedene Beschallungskonzepte, macht Vorschläge für das richtige Vorgehen bei Planung, Ausschreibung und Abnahme der Anlage und gibt messtechnisch überprüfbare Anforderungen an solche Anlagen.

4.7 Höranlagen für Hörbehinderte

Die DIN 18041 enthält Angaben zu Höranlagen für Hörbehinderte. Entsprechende Angaben mit Hilfen für die Planung finden sich auch in [7], [21]. Die Planung von Höranlagen in Auditorien, bei welchen sich seitlich oder vertikal in unmittelbarer Nachbarschaft weitere Auditorien mit Höranlagen befinden, ist besonders anspruchsvoll. In solchen Fällen müssen ausgewiesene Planer beigezogen werden.

5. Beispiele

5.1 Schulzimmer 1

In einem Schulhaus mit ausgezeichneter Architektur wurde die Akustik zu wenig konsequent beachtet. Das Schulzimmer ist grosszügig bemessen. Der Innenausbau überzeugt visuell. Aber akustisch harte Materialien dominieren den Raum. Die Decke ist aus Sichtbeton, der Boden aus grossen Steinplatten. Zudem gibt es eine grosse Fensterfront. Die restlichen Flächen sind aus Holz. Das Schulzimmer eignet sich offenbar recht gut für Gesang und Musik. Über die Sprachverständlichkeit gibt es widersprüchliche Aussagen.

Bei der messtechnischen Überprüfung wurden die Nachhallzeit und der Sprachverständlichkeitsindex STI im unbesetzten und besetzten Raum ermittelt. Die Resultate zeigen, dass die Nachhallzeit weder die älteren noch die neueren Empfehlungen erfüllen. Im Mitteltonbereich beträgt die Nachhallzeit unbesetzt 1.2 s, besetzt 0.8 s. Die Messung der Sprachverständlichkeit ergibt nur befriedigende, aber nicht gute Werte.

² Liste der SGA: <http://www.sga-ssa.ch/pdf/exams/experten.PDF>

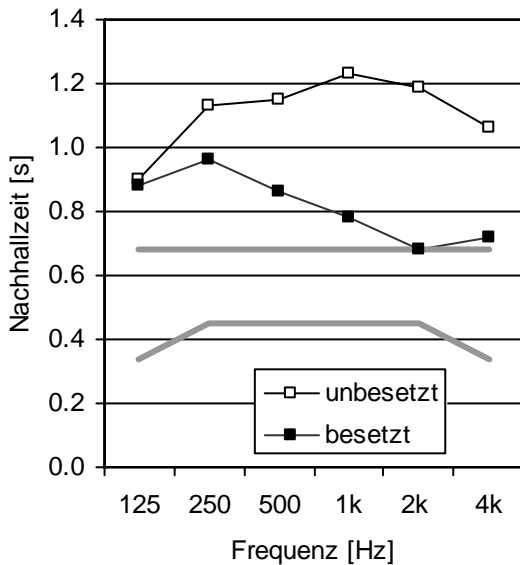


Abbildung 5 Nachhallzeit in einem Schulzimmer ohne besondere akustischen Massnahmen. Die grauen Linien zeigen den Bereich der optimalen Nachhallzeit gemäss DIN 18041

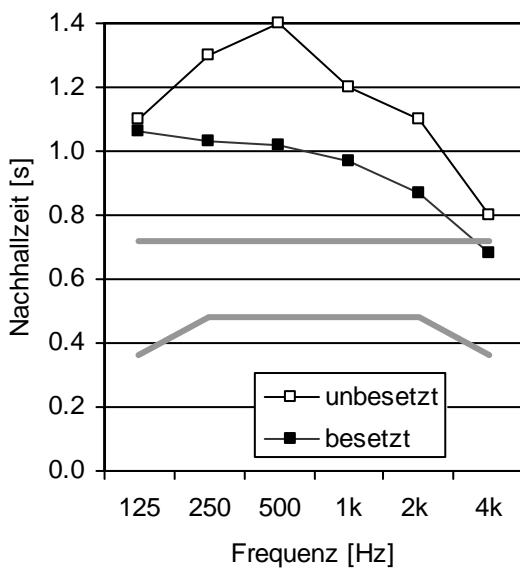
Bemerkenswert ist die relativ kurze Nachhallzeit im Tieftonbereich. Die vielen Holzflächen (Täfer), die zudem zum Teil mit Mineralwolle hinterfüllt sind, bewirken eine starke und willkommene Schallabsorption der tiefen Frequenzen. Es fehlt jedoch die im Mitteltonbereich notwendige Absorption. Es brauchte jetzt noch eine bestimmte Fläche, welche in diesem Tonhöhenbereich Schall absorbiert - eine Herausforderung an die

Architekten. Sie wäre weniger hoch gewesen, hätte man die Akustik von Anfang an besser mit einbezogen.

5.2 Schulzimmer 2

Das Schulzimmer befindet sich in einer Berufsschule der 70er Jahre. Die Ausstattung ist ähnlich wie beim oben zitierten Schulzimmer. Der Boden ist aber mit Spannteppichen belegt. Es sind keinerlei akustische Massnahmen erkennbar. Vom Dozenten wird die Akustik als sehr mühsam bezeichnet. Nach vier Stunden Unterricht klagt er regelmässig über Halsschmerzen z. T. auch über Kopfschmerzen. Die SchülerInnen äussern sich auch nicht besonders lobend über die Akustik. Oft ist die Kommunikation erschwert.

Die Nachhallzeit beträgt im unbesetzten Zustand im Mitteltonbereich rund 1.3 s. Besetzt liegt sie geschätzt bei etwa 1 s. Die Werte sind für ein Schulzimmer also zu hoch.



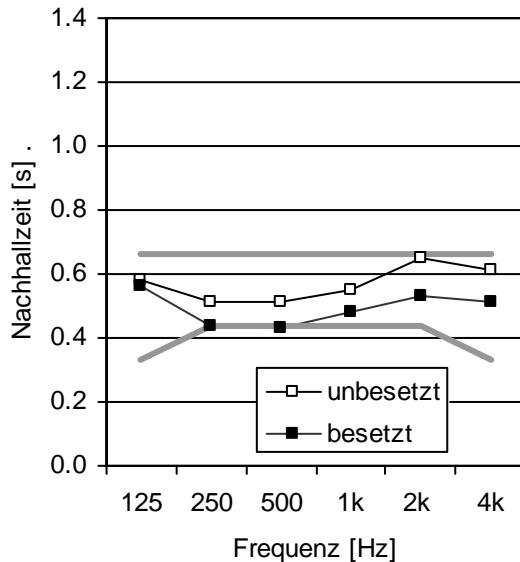
Der Spannteppich wirkt nur bei den hohen Frequenzen. In dem für die Sprache wichtigen Mitteltonbereich (500 Hz - 2000 Hz) ist die Nachhallzeit zu lang.

Für eine Sanierung sind die Decke und die Seitenwänden gemäss Berechnungen nach der Formel von Sabine teilweise schallabsorbierend zu verkleiden

Abbildung 6 Nachhallzeit in einem Schulzimmer ohne besondere akustische Massnahmen.

5.3 Schulzimmer 3

In einem neuen Schulhaus sind die Schulzimmer altersgemäss unterschiedlich gestaltet, Der Grundriss ist selten ein Rechteck und in jedem Raum anders. Bei der Planung wurde vom Architekten grossen Wert auf eine gute Akustik gelegt. Wegen der Kosten kam für akustische Massnahmen leider nur die Decke in Frage. Sie wird mit einer einfachen Verkleidung versehen, ähnlich wie in Abbildung 9 dargestellt. Dabei ergibt sich



in den Schulzimmer eine Nachhallzeit, welche an der unteren Grenze Toleranzbereichs der DIN Norm liegt.

Die LehrerInnen sind sehr gut zufrieden mit den akustischen Verhältnissen. Die Sprachverständlichkeit ist gut. Auch Singen und Musizieren ist gut möglich, was der Musiklehrer bestätigt.

Abbildung 7 Nachhallzeit in einem Schulzimmer mit Akustikdecke

5.4 Hörsaal an Hochschule

In einem architektonisch ansprechenden grossen Hörsaal einer Hochschule beschwerten sich vor allem Dozenten über die angeblich schlechte Akustik.

Bei einem Augenschein sind akustische Massnahmen deutlich erkennbar. Ein Blick in die Akten zeigt, dass die Nachhallzeit optimal ist, was auch hörbar ist. Sprechversuche und Händeklatschen machen aber ein Mehrfachecho hörbar. Ursache ist die Rückwand, welche ideal für Rückwürfe und Mehrfachechos ausgerichtet ist. Sie sind auch beim Betrieb der Beschallungsanlage hörbar (siehe Abbildung 8).

Es genügt nicht, nur die Nachhallzeit zu optimieren. Ebenso wichtig sind Massnahmen zum richtigen Lenken des Schalls und zum Vermeiden von Echos und Flatterechos (siehe 4.4). Eine Sanierung durch eine absorbierende Verkleidung der Rückwand ist ohne weiteres möglich, verursacht aber Kosten und Umstände.

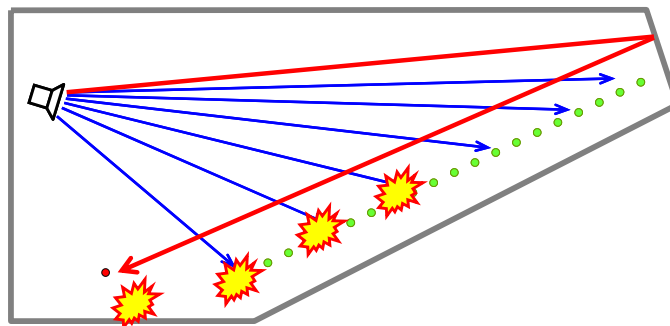


Abbildung 8 Schematische Darstellung des störenden Schallrückwurfs in einem Hörsaal

5.5 Stark vereinfachtes Berechnungsbeispiel [2]

Welche Fläche von Absorptionsmaterial mit dem Absorptionsgrad α ist in folgendem Raum notwendig, um eine Nachhallzeit von T_{soll} zu erreichen?

Grundfläche: 72 m^2 , Höhe: 3.5 m , Volumen: 250 m^3

Nachhallzeit: 1.3 s (Zustand ohne besondere akustische Massnahmen)

Berechnung mit der statistischen Nachhalltheorie:

	$T_{\text{soll}} = 0.7 \text{ s}$	$T_{\text{soll}} = 0.5 \text{ s}$	$T_{\text{soll}} = 0.3 \text{ s}$
$\alpha \approx 0.8$	35 m^2	60 m^2	130 m^2
$\alpha \approx 0.6$	45 m^2	85 m^2	175 m^2
$\alpha \approx 0.4$	90 m^2	165 m^2	350 m^2

In diesem Raum könnte mit gut absorbierendem Material ($\alpha \approx 0.8$) bereits mit einer Verkleidung von etwas mehr als der halben Deckenfläche die Nachhallzeit stark reduziert werden.

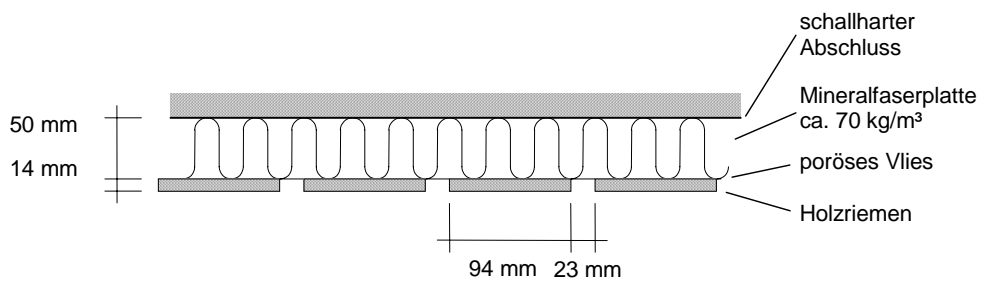


Abbildung 9 Guter Schallabsorber aus Holzriemen mit Luftspalten

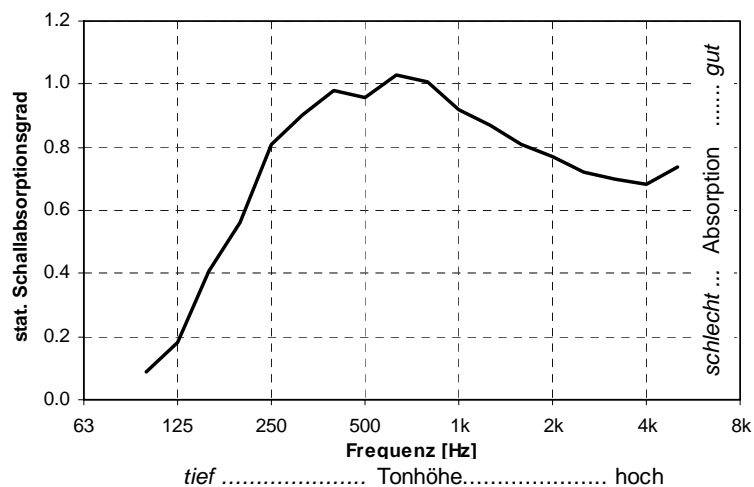


Abbildung 10 Schallabsorptionsgrad des Absorbers von Abb. 5.

Literaturverzeichnis

- [1] Marie Meierhofer-Institut für das Kind (Hrsg.), Viel Lärm um nichts. <undKinder> Nr. 65, April 2000
- [2] Ludowika Huber, Joachim Kahlert, Maria Klatte. Die akustisch gestaltete Schule: Auf der Suche nach dem guten Ton. Edition Zuhören ; Band 3, Vandenhoeck & Ruprecht 2002.
- [3] St. Gobain Ecophone (Hrsg.). Don't limit your senses. Sound and the learning environment. ISBN 91-974193-2-x
- [4] Mackenzie, David J. Airey, Sharon (1999), Classroom acoustics – a research project. Summery report. Heriot-Watt University Edingburgh.
- [5] J. Seidel, L. Weber, P. Leistner, 'Acoustic properties in German class rooms and their effect on the cognitive performance of primary school pupils', Forum Acusticum 2005, Budapest
- [6] J. M. Klatte, M. Wegner, J. Hellbrück, 'Noise in the school environment and cognitive performance in elementary school children. Part B - Cognitive psychological studies', Forum Acusticum 2005, Budapest
- [7] Eggenschwiler K., Karg S., Norman D., Hörbehindertengerechte Gestaltung. Beschallungsanlagen, Höranlagen und Raumakustik. Schweizerische Fachstelle für behindertengerechtes Bauen. Zürich 2002
- [8] DIN 18041, Ausgabe: 2004-05. Hörsamkeit von kleinen und mittleren Räumen.
- [9] Tennhardt H.-P., Einfluss des aktuellen Wissenstands auf die Normung im Bereich der Klassenraumakustik. DAGA 2003
- [10] SGA (Hrsg.), Richtlinie für die Akustik von Schulzimmern und anderen Räumen für Sprache. SGA, 21. Juni 2004, (<http://www.sga-ssa.ch>), deutsch, französisch und italienisch.
- [11] Schweizer Ingenieur und Architekten Verein SIA, Norm SIA 181 (2005) Schallschutz im Hochbau
- [12] Acoustical Society of America, ASA. Classroom acoustics. A resource for creating learning environments with desirable listening conditions.
- [13] Department for Education and Employment (DfEE). Guidelines for environmental design in schools. Building Bulletin 87 (BB87). DfEE. (1997) Building Bulletin 93 Part A
- [14] Swedish Standard Institution. SS 02 52 68 Acoustics – Sound Classification of spaces in buildings – institutional premises, room for education, day centres anf after school centers, room for office work and hotels. SIS. (in Swedish) 2001
- [15] Fasold W., Veres E.: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Verlag für Bauwesen, Berlin 2003
- [16] Mommertz E., Drescher K., Enger G., Untersuchung zur Anordnung schallabsorbierender Oberflächen in Klassenräumen. DAGA 2003, Aachen
- [17] EN 12343-6. Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 6: Schallabsorption in Räumen.
- [18] Eggenschwiler Kurt, Heutschi Kurt, Raumakustische Planungs- und Messverfahren. Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 38 17. September 1998, Seiten 12 - 16
- [19] Eggenschwiler K., Baschnagel K., Anforderungen an Beschallungsanlagen für Hörsäle, DAGA 2003 in Aachen.
- [20] Eggenschwiler K., Lecture Halls - Room Acoustics and Sound Reinforcement, Forum Acusticum, Budapest 2005, p. 2059 - 2064
- [21] Eggenschwiler K., Desarnaulds V., Imhof, Th., Köller W., Norman D., Beschallungsanlagen für Sprache. Empfehlungen für Architekten und Bauherrschaften, Schweizerische Gesellschaft für Akustik SGA, 2001, <http://www.sga-ssa.ch>

2005-10-25