

Thesen zur Akustik anspruchsvoller Räume

Teil 2: Bass-Verhältnis und Schallbelastung in kleineren Räumlichkeiten

Helmut V. Fuchs

Die Nachhallzeit als raumakustisches Kriterium

In Teil 1 wird diskutiert, warum die Absorption an Decke und Wänden eines Raumes viel über dessen akustische Qualität aussagt. Ihr tieffrequenter Anteil ist bei den größeren Räumen stets von besonderer Bedeutung. Man könnte zwar meinen, dass ein $BR > 1$ (Erläuterung siehe [1]) die meist schwächere Schallemission der Instrumente und Stimmen sowie die geringere Empfindlichkeit und das schnellere Abklingen der Lautstärke im menschlichen Hören durch längeres Nachhallen im Raum bei den Tiefen irgendwie ausgleichen könne. Dieser rein energetischen Vorstellung stehen aber destruktive Interferenzen der direkten Schallwellen mit frühen Reflexionen von den lateralen Raumbegrenzungen bei tiefen Frequenzen entgegen. Diese können die Klarheit von Musik und Deutlichkeit von Sprache beim Hörer beeinträchtigen und daher ein $BR \leq 1$ nahelegen. Sollte bei kleineren Räumen etwa ein $BR > 1$ eher tolerierbar sein? Dagegen spricht schon eine ganz simple praktische Beobachtung: Wenn ein Büro, Unterrichts- oder Speiseraum mit rundum schallharten Begrenzungen sich sukzessive mit Personen füllt, bringen diese mindestens so viel Absorption mit wie eine konventionelle „Akustikdecke“ und entsprechend absorbierende Wandpaneele, allerdings wie diese nur bei hohen und mittleren Frequenzen. Und immer steigt deswegen der Schallpegel im Raum mit der Belegung und gemeinsam mit dem BR kontinuierlich an. Erst wenn man dafür sorgt, dass die Nachhallzeit (als einfaches integrales Maß für die Absorption im Raum) auch bei den Tiefen begrenzt wird, sinkt der Pegel deutlich, weil diese Maßnahme nicht nur physikalisch, sondern auch psychoakustisch auf die Nutzer einwirkt, die hier Täter und Opfer zugleich sind.

Die Schallbelastung durch schlechte Raumakustik

Hier geht es um die große Masse der kleineren Büro-, Konferenz-, Unterrichts-, Probe- und Speiseräume. In diesen sollte eigentlich nicht das architektonische Design, sondern die ergonomische Funktion ganz im Vordergrund stehen – getreu dem Prinzip „*form follows function*“. Jede Kommunikation zwischen Sprechern oder Musikern verlangt gleichermaßen nach Deutlichkeit und Klarheit in allen Details, um Arbeit bzw. Freizeit effizient bzw. behaglich zu gestalten.

Insbesondere sollte der Raum nicht schuld daran sein, dass die von seinen Nutzern darin erzeugten Schalldruckpegel die Ohren betäubend, die Nerven belastend, das Verstehen und Lernen erschwerend sowie die Gesundheit schädigend anwachsen können. Aber unter diesen Belastungen hat z. B. ein großer Teil der Lehrenden und Lernenden in Deutschland täglich stundenlang zu leiden!

Auch dieser skandalöse Zustand hat etwas mit fehlender Absorption bei tiefen Frequenzen zu tun: in den genannten Räumlichkeiten liegt das Bassverhältnis nach Gleichung (2) in [1] fast immer weit über 1, nicht selten bei Werten um 2. Dazu heißt es bei H. Kuttruff: „Nach tiefen Frequenzen zu sollte die Nachhallzeit eher etwas kürzer sein, da sonst die für die Sprachverständlichkeit wichtigen höheren Komponenten des Sprachspektrums verdeckt werden“ [2] und auch bei M. Vorländer: „Für die Sprachverständlichkeit ist vorteilhaft, wenn die Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen niedriger ist als im mittleren Frequenzbereich“ [3] sowie in einem Sachbuch zum Thema: „Für tiefe Frequenzen sollte die Nachhallzeit nicht ansteigen“ [4]. Alle könnten sich dabei auf die einleitend zitierten alten Meister berufen, siehe auch [5, Abschn. 11.6 und 13.4]. Ebenso empfahl die DIN 18041–2004 eine solche Auslegung der Nachhallzeit. 2005 wurde dergleichen in ÖNORM B 8115 sogar baurechtlich festgelegt. Umso unverständlicher ist der in der DIN 18041–2016 tolerierte Anstieg gemäß Abbildung 1 in [1]. Gegen diesen Rückschritt wendet sich auch dieser Teil 2, weil er wissenschaftlichen Erkenntnissen zur Sprachverständlichkeit und praktischen Erfahrungen aus Sanierungen z. B. von Klassenzimmern, Speisräumen oder Orchestergräben widerspricht. Tatsächlich lässt sich mit der richtigen Bedämpfung der Räume nicht nur Schall physikalisch angemessen absorbieren, sondern zusätzlich rückwirkend die „Lärmemission an der Quelle“, den Stimmen und Instrumenten, mindern. Aber der Reihe nach:

Die Verwischung von Sprache durch Nachhall

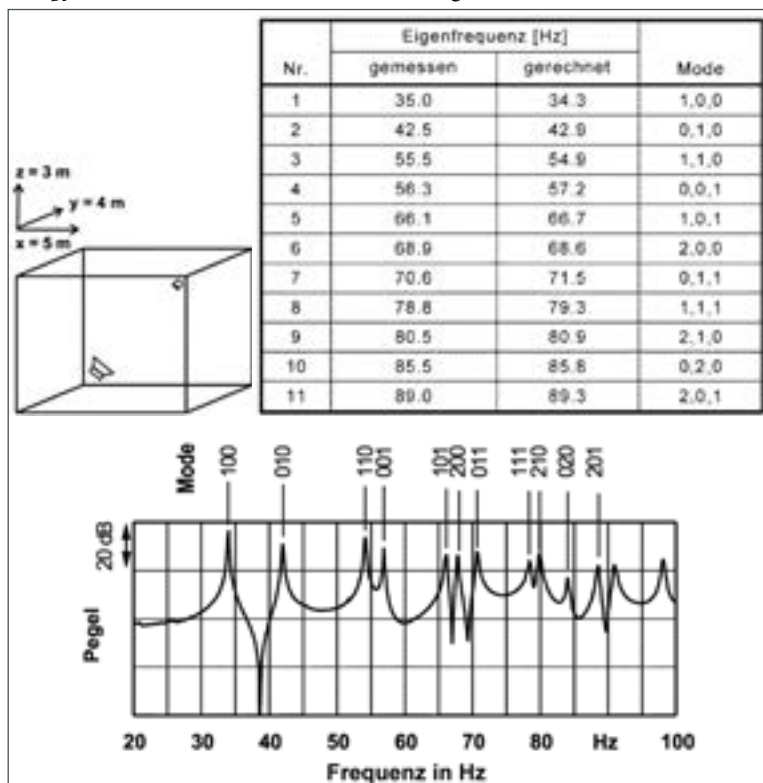
Dass ein Sprecher, eine Sprecherin trotz bester Artikulation nicht verstanden wird, kann an einer zu schwachen Stimmkraft oder/und einem zu langen Nachhall liegen. Dieser kann in einem größeren Raum aufeinander folgende Silben mit ähnlichem Spektrum bis zur Unkenntlichkeit verschmelzen.

Tab. 1: Verwischung von Silbenfolgen mit der Frequenz f_p durch ihren eigenen Nachhall T in s im Raum

f_p [s ⁻¹]	Δt_p [ms]	T [s]	ΔL_T [dB]				
			5	2,5	1,25	0,63	0,31
16	63		0,8	1,5	3	6	12
8	125		1,5	3	6	12	24
4	250		3	6	12	24	
2	500		6	12	24		
1	1.000		12	24			

Nach [6, Abschn. 3.5] beträgt die durchschnittliche Silbendauer Δt_p etwa 125 bis 500 ms entsprechend einer Folgefrequenz f_p von 2 bis 8 Silben pro s . Wenn nur eine Silbe pro Sekunde ausgesendet würde, könnte diese selbst bei Nachhallzeiten von $T = 2,5$ bzw. 5 s nicht mit einer (gleich laut angenommenen) nachfolgenden verschmelzen, weil ihr Raumpegel inzwischen (überschlägig) schon um $\Delta L_T = 24$ bzw. 12 dB abgeklungen wäre (siehe Tabelle 1). Bei normaler Sprechweise ($f_p = 4$ s⁻¹, $\Delta t_p = 250$ ms, Zeile 3 in Tab. 1) sollte aber schon $T = 2,5$ s mit $\Delta L_T = 6$ dB einen Verwischungseffekt verursachen, insbesondere wenn

Abb. 1: Diagonal über Eck gemessene Übertragungsfunktion eines ungedämpften Quaders mit den Abmessungen $5 \times 4 \times 3 = 60$ m³



die nachfolgende Silbe derselben oder einer anderen Quelle beim Hörer nicht mit gleichem, sondern mit einem etwas geringeren Anfangspegel ankommt. Dass bei viel schnelleren Tonfolgen von Musikinstrumenten ($f_p = 16$ oder 32 pro Sekunde) in einem großen Raum mit einer mittleren Nachhallzeit von bis zu 3 s , etwa wie in Teil 1 (dort Abb. 2) beschrieben, das Nachklingen zu keiner Verwischung führen muss, liegt daran, dass der Raum zwischen zwei Tönen überhaupt nicht anklingen kann und das Zuhören hier ganz wesentlich vom Direktschall und den frühen Reflexionen bestimmt wird. Bei einem Nachhall unter 1 s , wie er in kleinen Räumen generell anzustreben ist, sollte diese Art der Verwischung aber eigentlich nicht stören. Dass man aber gerade hier oft sein eigenes Wort nicht mehr versteht, hat ganz andere Gründe, die im Folgenden besprochen werden sollen.

Die Anregung diskreter Raum-Resonanzen bei tiefen Frequenzen

In großen Räumen kann die Überlagerung von Direktschall mit frühen Reflexionen von Begrenzungsflächen bei tiefen Frequenzen die Klarheit von Musik und Verständlichkeit von Sprache einschränken [1, Tab. 2]. Dem gegenüber werden in kleinen Räumen durch jede Stimme und alle Geräusche ganz unmittelbar (ohne merkliches Einschwingen) stehende Wellen nach Art eines kompakten Hohlraum-Resonators angeregt. Diese Eigenresonanzen (Moden) des Raumes stören unterhalb einer nach M. R. Schröder benannten Frequenz f_s

$$f_s / \text{Hz} = 2000 \sqrt{\frac{T / s}{V / \text{m}^3}}, \quad (1)$$

bei akustischen Messungen und – von weniger sensiblen Nutzern oft unbemerkt – ebenso jede Unterhaltung. Die Frequenz f_s ist nicht von den Proportionen des Raumes abhängig, sondern wesentlich von dessen Volumen V und Nachhallzeit T . Mit den mittleren Abmessungen l_x, l_y, l_z lassen sich die diskreten Resonanzfrequenzen auch bei schrägen Wänden, wie oft in Hallräumen, nach

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}; \quad n_x, n_y, n_z = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

mit der Schallgeschwindigkeit c_0 gut berechnen und in der Übertragungsfunktion durch entsprechende Pegelspitzen bestätigen, siehe z. B. Abbildung 1 und [5, Kap. 2]. Diese können nicht nur alle tonalen Spektren stark verfärben, sondern auch tieffrequente Sprachkomponenten, die im Freifeld gemessen weniger Energie als bei mittleren Frequenzen aufweisen, erheblich verstärken – mit schädlichen Folgen, die im Folgenden angesprochen werden.

Die Verdeckung hoher durch tiefe Frequenzen

Die Moden können, wenn sie nicht angemessen bedämpft werden, den Raum mit einem für Sprache wie für Musik inhaltsleeren, für jede Art des Kommunizierens und Musizierens schädlichen Dröhnen füllen. Dieses kann aber nicht nur die tieferen bis mittleren Frequenzkomponenten verdecken, die gemäß Abbildung 2 zwar im Mittel energetisch dominant erzeugt werden, die aber gemäß Abbildung 3 für die Sprachverständlichkeit von geringerer Bedeutung sind. Wie in Abbildung 4 am Beispiel eines Störpegels von 20 bis 80 dB bei 200 Hz dargestellt, sorgt vor allem eine unsymmetrische Maskierung dafür, dass die für die Verständigung viel wichtigeren, jedoch stets schwächeren Frequenzanteile der Konsonanten im kHz-Bereich viel stärker verdeckt werden. In größeren Räumen liegen dessen Eigenresonanzen im interessierenden Frequenzbereich viel dichter beieinander und stören nicht in gleicher Weise.

Die Lombard-Effekte beim Sprechen

Die Störung und Verdeckung durch die Anregung akustisch unzureichend konditionierter Räume wäre weniger schwerwiegend, wenn nicht beim Kommunizieren wie beim Musizieren ein nach E. Lombard benannter Effekt einträte. Danach wird die Stimme angehoben, wenn der Störpegel ansteigt, der durch andere Stimmen hervorgerufen wird, die wiederum ihrerseits als Reaktion auf den für sie jetzt stärkeren Störpegel im Raum angehoben werden u.s.w. [9]. Dieses Phänomen ist zwar seit Langem bekannt. Aber erst kürzlich wurden dazu in [10] sehr aufschlussreiche quantitative Ergebnisse präsentiert: Man ermittelte diese unwillkürliche Stimmanhebung

Abb. 3: Beitrag der Frequenzkomponenten in der Sprache für deren Verstehen nach [7, Kap. 10]

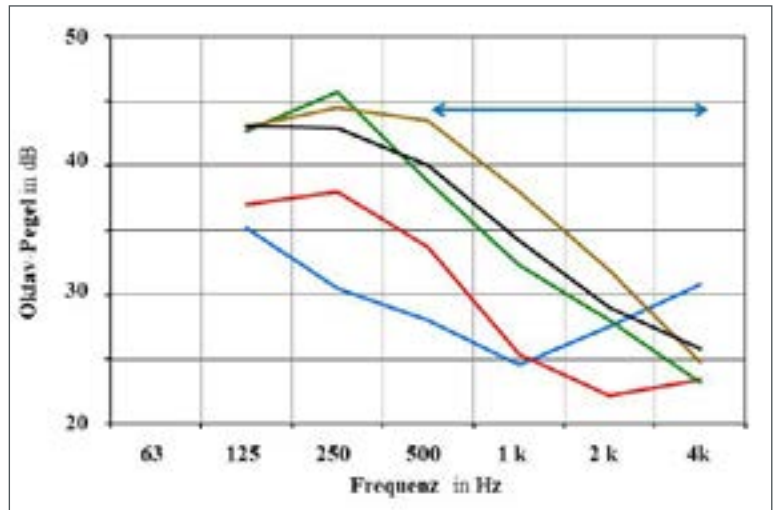
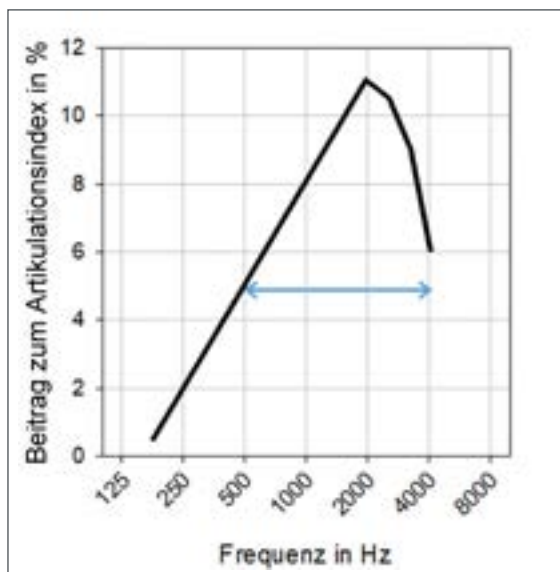
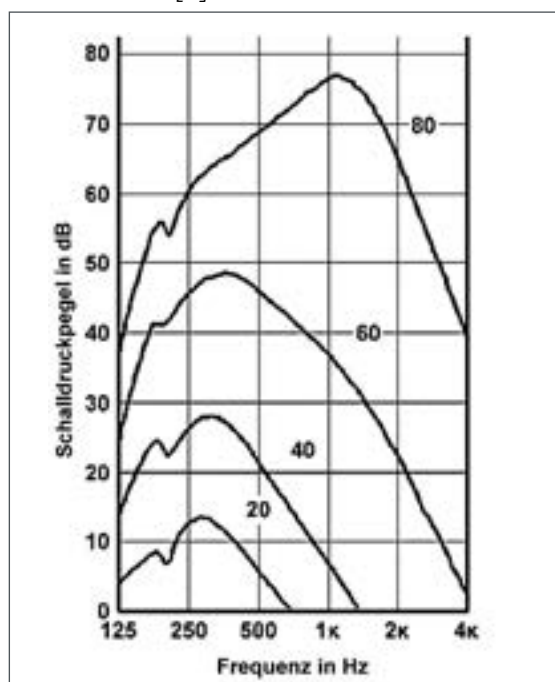


Abb. 2: Charakteristische Spektren von Sprachlauten, gemessen ab 125 Hz im Freifeld nach [6, Abschn. 3.3]; Frikative f,s,x (blau), Explosive p,t,k (rot), Halbvokale w,l,r (grün), Vokale a,e,o (braun), Mittelwert (schwarz)

(„vocal effort“) mit nacheinander 10 weiblichen und 10 männlichen normal hörenden Sprechern im Alter zwischen 18 und 34 (im Mittel 22) Jahren. Diese wurden in einer 14 m³ großen reflexionsarmen Kabine einem scheinbar aufmerksamen Zuhörer-Dummy in 2,5 m Abstand gegenüber gesetzt. Sie waren angehalten, einen ausgewählten, aus 6 Sätzen bestehenden Text so vom Blatt vorzulesen, dass sie sich vom so dargestellten Zuhörer bei unterschiedlichen Störpegeln immer gleich gut verstanden fühlten. Beim Vorlesen wurden sie über einen Studio-Monitor aus 2,5 m Entfernung in 5 dB-Schritten mit Pegeln zwi-

Abb. 4: Verschiebung der Hörschwellen durch einen maskierenden Ton bei 200 Hz und Pegeln zwischen 20 und 80 dB nach [8]



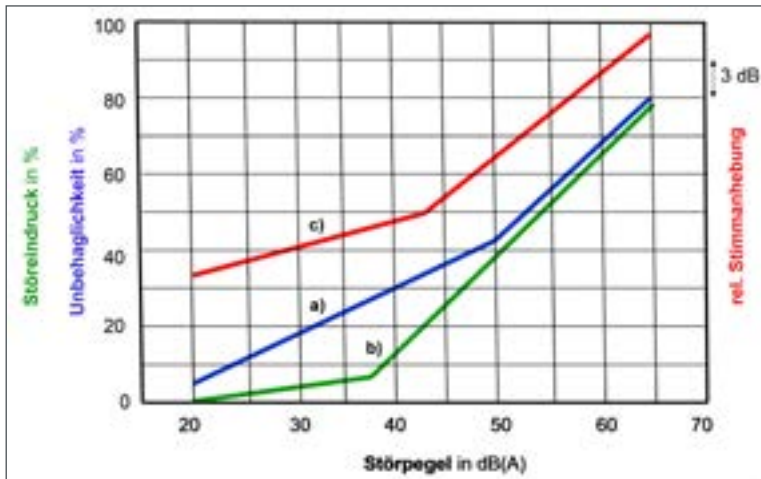


Abb. 5: Lombard-Effekte als Funktion stationärer Störpegel („rosa“ Rauschen), gemessen als a) Unbehaglichkeit, b) Störeindruck und c) Stimmhebung bei jungen, normal hörenden Erwachsenen nach [10]

schen 20 und 65 dB(A) beschallt. Sie lasen so mit einem Störabstand $\text{SNR} \geq 17$ dB. Außerdem sollten die Testpersonen dabei zu jeder dieser 10 Geräuschsituationen zum einen den von ihnen subjektiv wahrgenommenen Grad der Störung ihrer Vorlesung („perceived noise disturbance“) beurteilen und zum anderen ihr eigenes Unbehagen („perceived vocal discomfort“) einschätzen.

Im Blick auf die Anregung tiefer und die Verdeckung hoher Frequenzen gemäß den vorstehenden beiden Abschnitten erscheint die bei dieser Untersuchung gewählte spektrale Charakteristik des stationären Störgeräuschs sehr sinnvoll, nämlich „rosa“ Rauschen, dessen Energiedichte zu tiefen Frequenzen hin umgekehrt proportional zunimmt. Sowohl der objektiv festgestellte Anstieg des mittleren Sprechpegels ΔL in dB als auch die subjektiv bestimmten Parameter Störung und Unbehaglichkeit in % zeigten, wie nicht anders zu erwarten, zwar eine unterschiedlich starke Streuung. Trotzdem erscheinen die hier aus [10, Figure 1] in Abbildung 5 zusammengestellten Ergebnisse logisch.

Die Forscher fanden zwar wider Erwarten keinen richtigen Startpegel für das Einsetzen der Lombard-Effekte, aber doch eine Art Knick in allen 3 Anstiegen, etwa bei 49,5 dB(A) für die persönliche Unbehaglichkeit, 37,4 dB(A) für den funktionellen Störeindruck und 43,3 dB(A) für die sehr starke Stimmhebung, den eigentlichen Lombard-Reflex. Wie gut ein Sprecher sich selbst hören kann, hat also tatsächlich einen deutlichen Einfluss auf die von ihm produzierte Sprache. Man bedenke, dass beim Anwachsen des Raumpegels von moderaten 50 auf schon etwas unangenehme 65 dB(A) nach Abbildung 5c eine Stimmhebung um 10 dB zur Folge hat. Doch mit 65 dB(A) ist für viele Lehrer, Schüler und Restaurantbesucher die Spitze des Leidens noch längst nicht erreicht –

ganz zu schweigen von den Expositions-Pegeln über 90 dB(A), denen Musiker an ihren Arbeitsplätzen wie Orchestergräben und Proberäumen leider ausgesetzt sind, siehe [5, Abschn. 13.8]!

Ornithologen haben übrigens beobachtet, dass Singvögel ebenfalls in lauter Umgebung ihre Stimmkraft, etwa angepasst an den wachsenden innerstädtischen Lärm, verstärken, um sich so ihrem Auditorium besser hörbar zu machen. Die Ergebnisse in [10] machen deutlich, warum eine andere sehr nützliche Fähigkeit des menschlichen Hörsystems, jedenfalls in raumakustisch schlecht konditionierten kleinen wie großen Räumen, keine Chance bekommt: der Cocktail-Party-Effekt.

Der Cocktail-Party-Effekt

Mit gesunden binauralen Hörsystemen können Menschen und Tiere bei entsprechender Ausrichtung und Konzentration Schallquellen gut orten und wahrnehmen. Nur so werden die wunderbaren Hörerlebnisse bei stereophoner Wiedergabe von Sprache und Musik in Studioqualität erst möglich. Nach [11, Abschn. 1.2.5] hilft diese Fähigkeit nicht nur Musikern im Ensemblespiel, sondern auch einem Hörer bei mehreren ihn umgebenden Sprechern, eine Stimme gezielt herauszuhören, sofern der interessierende Schall um etwa 10 bis 15 dB über der durch den Störpegel bedingten Mithörschwelle liegt. Nach [12] kann demnach durch diesen „Cocktail-Party“-Effekt die Verständlichkeitsschwelle bei rundum verteilten Schallquellen einen bis zu 9 dB günstigeren Wert annehmen, als wenn sämtliche Schallsignale aus nur einer Richtung kämen. Übrigens haben z. B. Katzen auf der Jagd nach einer Maus nicht nur dieses „Ohrenspitzen“ optimal trainiert, sondern können ihr Hörsystem gezielt auf die hohen Frequenzen des Raschels im Gras scharf einstellen und die Störung durch tiefe Frequenzen gleichzeitig stark reduzieren. Eine solche Fähigkeit besitzt der Mensch leider nicht und ist deshalb den Raum-Moden und Lombard-Effekten schutzlos ausgeliefert, wenn er sie raumakustisch nicht in den Griff bekommt. Umso wichtiger ist es daher, auch in kleineren Räumen von vornherein mit absorbierenden Maßnahmen für akustische Transparenz zu sorgen:

Das Sprachverstehen bei unterschiedlicher Nachhall-Charakteristik

Die zuvor nach [9, 10] dokumentierten rein subjektiven bzw. intuitiven Befunde beruhen auf unterschiedlich gutem Verstehen der eigenen Sprache, welches bereits ohne einen Einfluss des jeweiligen Raumes, z. B. durch Hinzutreten weiterer Sprecher, reduziert werden und so eine Lautheitsspirale in Gang setzen kann. Aber bekanntlich bestimmen ne-

ben den Quellen im Raum auch dieser selbst den kumulierten Schalldruckpegel und damit rückwirkend auch die Sprachverständlichkeit. In einem ersten Versuch, diese quantitativ zu bestimmen, wurde der in Abbildung 1 angesprochene Laborraum gemäß Abbildung 6 mit unterschiedlichen Schallabsorbern konditioniert [13, Abschn. 11.4]:

- stark zu den tiefen Frequenzen abfallend ($BR \approx 0,63$) entsprechend dem Foto in Abbildung 6
- näherungsweise konstant zwischen 63 und 8 kHz ($BR \approx 1$)
- stark zu den tiefen Frequenzen ansteigend ($BR \approx 3,2$).

Probanden im Alter zwischen 20 und 50 Jahren testeten, frontal vor einem Studio-Monitor (etwa wie der Kunstkopf in Abbildung 6) im Abstand von ca. 3 m platziert, die Silbenverständlichkeit nach einem standardisierten Verfahren mit Logatomen bei stets gleichem Nutz- und Störsignal („rosa“ Rauschen zwischen 20 Hz und 20 kHz). Im unbedämpften Raum mit einer Nachhallzeit bis über 4 s wurden so im Mittel kaum mehr als 10 % der Silben richtig verstanden. Im Fall a) lag die Verständlichkeit mit etwa 68 % am höchsten und im Fall c) mit 53 % deutlich darunter, obgleich hier die mittlere Nachhallzeit nur etwa halb so groß gemessen wurde. Die gleichmäßig niedrige Nachhallzeit von ca. 0,4 s im Fall b) ergab wider Erwarten mit 59 % nicht den höchsten Wert.

Von nahezu allen Testpersonen wurde die Testumgebung a) als die behaglichste empfunden und die Silbenverständlichkeit auch subjektiv hoch geschätzt. Demgegenüber wurde Situation c) von allen Beteiligten als deutlich unbehaglicher eingestuft. Wenn also die Probanden hier, etwa wie in der Studie [11], selbst zum deutlichen Sprechen aufgefordert worden wären, hätten sie ihre Stimme also im Fall der Absorption vor allem oberhalb 250 Hz deswegen wohl intuitiv stärker als im Fall a) angehoben, um sich verständlich zu machen. Dies weist darauf hin, die Dämpfung bei mittleren Frequenzen gegenüber den tiefen nicht zu übertreiben (vgl. auch Abbildung 13 und 14). Sonst fördert die stärkere Dämpfung im mittleren Frequenzbereich die Verdeckung der für die Sprachverständlichkeit wichtigen mittleren bis höheren Frequenzkomponenten.

In sechs mit dem ODEON-Programm simulierten Räumen der Abmessung 8,4 x 7,7 x 3,9 m gemäß Abbildung 7 konnten die früheren Ergebnisse in ausführlicheren Tests nach aktuellem Stand audiometrischer Versuchstechnik (binaural über Kopfhörer) bestätigt werden [14]: Das rechte Säulenpaket (KG) in Abbildung 8 zeigt, noch ohne jedes Störgeräusch, den erwarteten geringen Einfluss der raumakustischen Gestaltung der Räume. Wenn ein zunächst

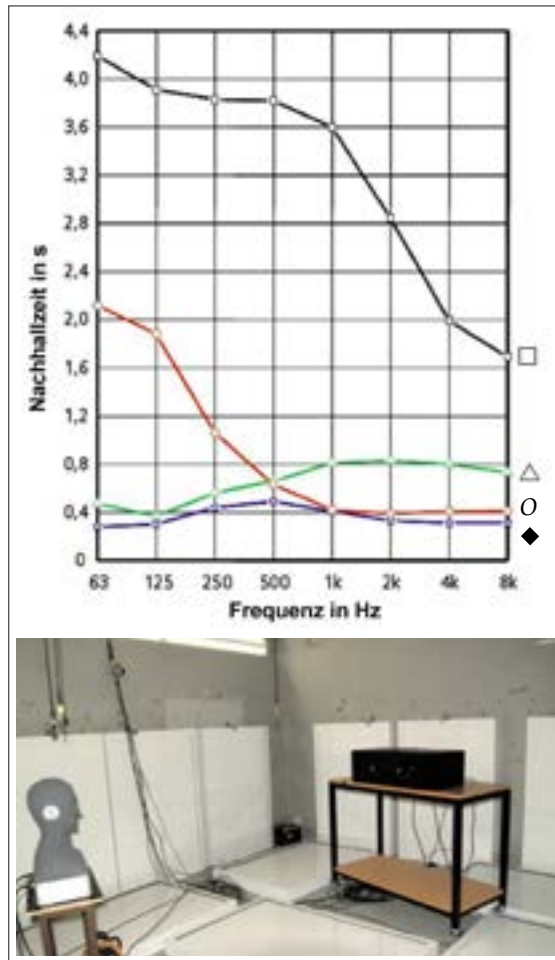
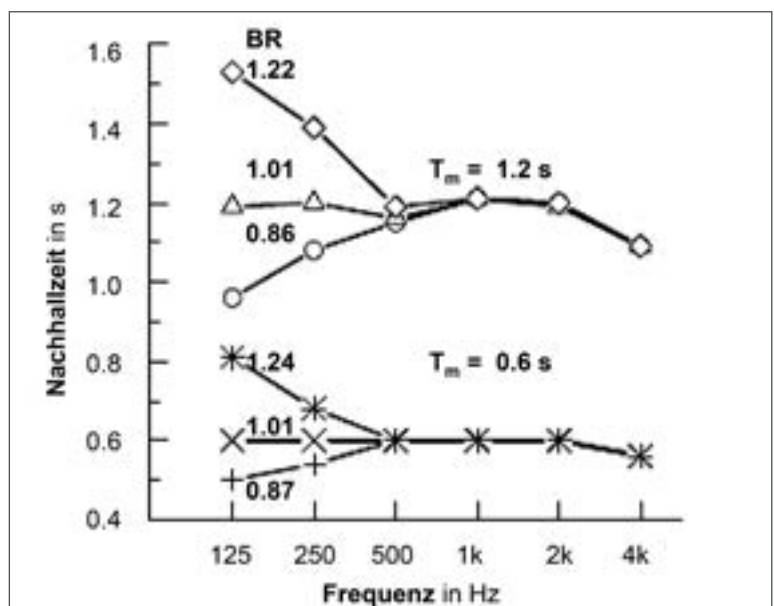


Abb. 6: Unterschiedliche raumakustische Konditionierung eines Laborraumes für Sprachtests im Fraunhofer-Institut; Leerraum (\square), starke Tiefen-Absorption für $BR < 1$ (Δ), starke Höhen-Absorption für $BR \gg 1$ (O), Breitband-Absorption für $BR \approx 1$ (\blacklozenge)

Abb. 7: Die verschiedenen Nachhallzeiten, wie sie sich aus der Impulsantwort der sechs simulierten Raum-Situationen 1.a (+), 1.b (x), 1.c (+), 2.a (o), 2.b (Δ), 2.c (\diamond) ergeben [14]



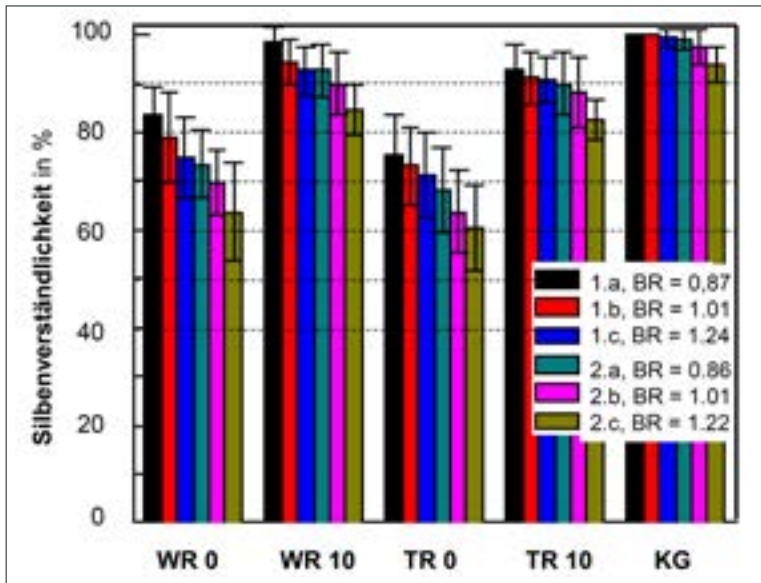


Abb. 8: Mittelwerte und Streubereiche der Silbenverständlichkeit bestimmt bei 32 Studenten in unterschiedlichen Raum- und Geräusch-Situationen; 1. Raum: $T_m = 0,6$ s, 2. Raum: $T_m = 1,2$ s; versch. Bass-Verhältnisse BR und Störabstände: WR(0)/WR(10) ▶ Weißes Rauschen 0 dB / 10 dB, TR(0)/TR(10) ▶ Tiefenbetontes Rauschen 0 dB / 10 dB, KG ▶ Kein Geräusch [14]

nur schwaches tiefenbetontes Störsignal mit einer Charakteristik, wie in Abbildung 9 dargestellt, mit einem Störabstand von $SNR=10$ dB(A) überlagert wird (Paket TR 10 in Abb. 8), sinken die ermittelten Werte um bis zu 10 %. Bei einem um 10 dB(A) stärkeren Störsignal gleichen Spektrums (TR 0) fällt die Verständlichkeit aber bis auf 60 % ab. Gleichzeitig wächst der durch die schwarzen Spangen angedeutete jeweilige Streubereich erheblich an. Der Störeinfluss durch „weißes Rauschen“ (WR 10 und WR 0 in Abb. 9) mit gleichem A-bewerteten Schalldruckpegel ist deutlich geringer.

Abb. 10: Silbenverständlichkeit bei Störung durch unterschiedliches stationäres Rauschen bestimmt bei 8 bis 9 Jahre alten Schülern (blaue Kurve), 10 bis 11 Jahre alten Schülern (rote Kurve) und Erwachsenen (schwarze Kurve) in zwei Raum-Situationen; a) Nachhallzeit bei 0,6 s, b) bei 1,2 s [15]

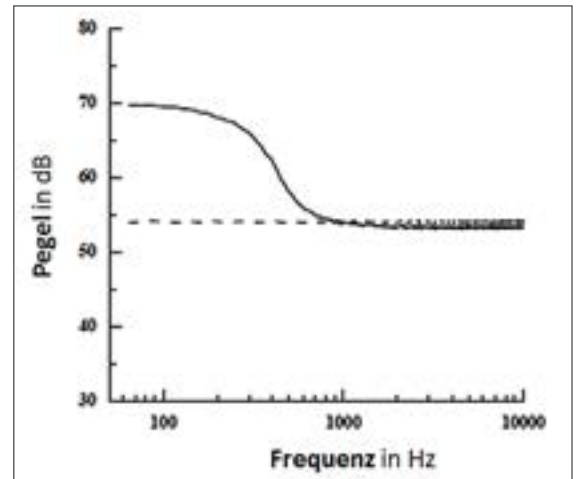
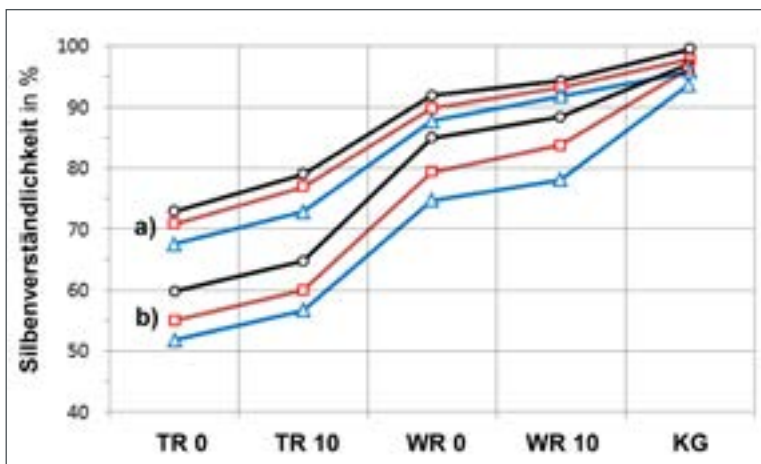


Abb. 9: Störgeräusch-Spektren, die in die gemäß Abbildung 7 simulierten Räume eingespielt wurden; tiefenbetontes (durchgezogen) bzw. „weißes“ (strichliert) Rauschen [14]

Schließlich wird in Abbildung 10 der Einfluss des Alters der Probanden nach [15] deutlich gemacht: Je jünger diese sind, umso schwerer fällt ihnen offensichtlich das Verstehen und zum umso lauterem Artikulieren tendieren sie selbst z. B. in einer realen Unterrichtssituation – mit den bekannten fatalen Folgen. Umso wichtiger ist für sie eine angemessene akustische Gestaltung des Raumes. Diese Ergebnisse lassen keinen Zweifel zu, dass die tiefen Frequenzen bei der raumakustischen Gestaltung hohe Aufmerksamkeit verdienen, besonders wenn man an junge und/oder sprachbehinderte sowie nicht muttersprachliche Personen denkt. Sie widersprechen fundamental den in [16] präsentierten Ergebnissen. In [16] wurden, ähnlich wie in [14 und 15], unterschiedliche Nachhallzeiten mit einem CAIT-Programm simuliert. Den Probanden wurde darin binaural über Kopfhörer ein 10 s dauerndes Sprachsignal (ohne ein Störsignal), jeweils im Paarvergleich, angeboten. Sie sollten nur jeweils subjektiv beurteilen, „bei welchem Beispiel die Sprachverständlichkeit besser ist“. Man kommt so in [16] zu dem fatalen Schluss, dass der Nachhallzeit unter 250 Hz keine wesentliche Bedeutung für die Sprachverständlichkeit zukomme, so wie es dann leider in dem gegenüber früheren Norm-Anforderungen stark ausgeweiteten Toleranzbereichs gemäß Abbildung 1 in [1] seinen Niederschlag fand. Welchen dominanten Einfluss aber unterschiedliche Störgeräusche auf die Silbenverständlichkeit haben, wird im Folgenden quantifiziert.

Das Sprachverstehen bei verschiedenen Geräuscharten

Nach den Ausführungen zur Verdeckung überrascht es natürlich nicht, dass die Ergebnisse in Abbildung 8

und 10 mit höhenbetontem Störsignal („weißem“ Rauschen) bei gleichem Störabstand grundsätzlich besser ausfallen als mit tiefenbetontem, vgl. jeweils Paket WR 10 mit TR 10 sowie WR 0 mit TR 0. Noch bedeutsamer, auch zur Erklärung der Diskrepanz zu den Untersuchungen ganz ohne Störsignale in [16], sind die Ergebnisse in [17]: Abbildung 11 zeigt die quantitativen Ergebnisse der richtig erkannten Logatome bei Überlagerung mit sehr verschiedenen Geräuschen, aber mit konstantem $\text{SNR} = 10$ bzw. 0 dB(A) , für zwei simulierte Räume mit konstantem, in der Praxis leider „normalem“ Bassverhältnis $\text{BR} \approx 1,3$, aber unterschiedlicher mittlerer Nachhallzeit $T_m = 0,83$ bzw. $1,3 \text{ s}$.

Bei der niedrigeren Nachhallzeit und hinreichend großem Störabstand (Abb. 11 a) bleibt die Verständlichkeit für alle Geräuscharten größer als 90% , selbst für die jüngsten Schüler. Am wenigsten überrascht, dass in regelmäßigen Abständen von $1,6 \text{ s}$ eingespielte Schlaggeräusche in allen Fällen die geringsten Einbußen verursachen, wohl weil den Probanden zwischen zwei Pegelspitzen Zeit bleibt, um bei um 11 dB niedrigeren Pegeln Testsilben noch gut zu verstehen. Etwas kritischer stellt sich, insbesondere bei geringem Störabstand (Abb. 11 b und d), schon ein gleichmäßiges Verkehrsgeräusch dar. Noch etwas geringere Verständlichkeit ergibt sich für eingespieltes, wahrscheinlich tonhaltiges Gebläsegeräusch. Deutlich schlechtere Ergebnisse werden erzielt bei gleichlauter Störung durch ein gleichmäßiges Geräusch, dessen Spektrum der Sprache nachgebildet wurde. Das wichtigste aus [17] ablesbare Ergebnis ist aber, dass Personen jeden Alters bei gleichem Störpegel objektiv am stärksten durch ein lautes natürliches Stimmengewirr gestört werden, besonders in akustisch schlecht konditionierten Räumen. Wieder sind es die jüngsten Schüler, die von jedem „Gebrabbel“ am meisten gestört werden, abzulesen an Ergebnissen von 54% für $T_m = 0,83 \text{ s}$ und nur noch 40% für $1,3 \text{ s}$. Auch nach [18] stört ein ganz gleichmäßiges Geräusch ohne jeden Informationsgehalt viel weniger als impulshaltiges, selbst mit völlig irrelevanten Informationen. Sogar eine noch nicht richtig verstandene oder Fremdsprache, sogar rückwärts abgespielte Sprache, können demnach, völlig nutzlos, Aufmerksamkeit binden und Anspannung erzeugen, die dann die kognitiven Ressourcen verknappen und so zur Überforderung des für das Verstehen wichtigen Kurzzeitgedächtnisses und zu rascher Ermüdung führen. Die raumakustische Qualität offenbart sich deshalb auch besser inmitten einer im Raum munter diskutierenden Gesprächsgruppe, als durch das übliche Händeklatschen. Um aber mit dem hier propagierten raumakustischen Konzept ($\text{BR} \leq 1$) Praktiker zu überzeugen, muss seine Überlegenheit im direkten Vergleich mit

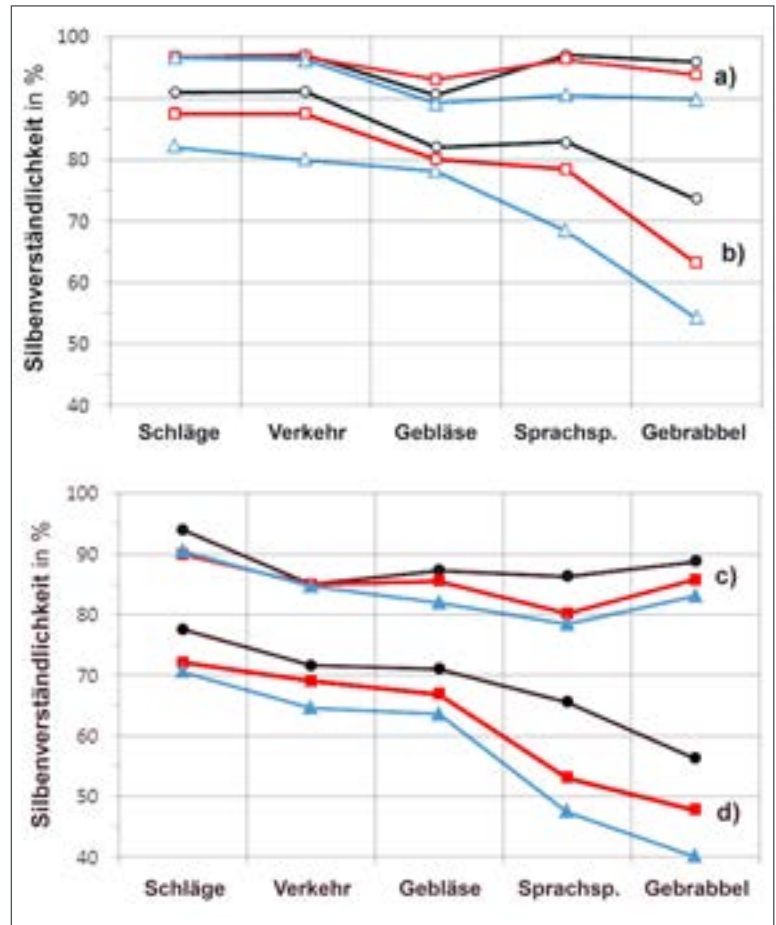


Abb. 11: Silbenverständlichkeit bei Schülern mit zunehmendem Alter wie in Abbildung 10 (jeweils Kurven von unten nach oben tendierend); a) $T_m = 0,83 \text{ s}$, $\text{BR} \approx 1,3$, $\text{SNR} = 10 \text{ dB(A)}$, b) $T_m = 0,83 \text{ s}$, $\text{BR} \approx 1,3$, $\text{SNR} = 0 \text{ dB(A)}$, c) $T_m = 1,30 \text{ s}$, $\text{BR} \approx 1,3$, $\text{SNR} = 10 \text{ dB(A)}$, d) $T_m = 1,30 \text{ s}$, $\text{BR} \approx 1,3$, $\text{SNR} = 0 \text{ dB(A)}$ nach [17]

der konventionellen Technik in realen Räumen wie im Folgenden vorführbar gemacht werden.

Drei charakteristische raumakustische Gestaltungen

Aus dem Vorstehenden sollte klar werden, dass die Nachhallzeit kleinerer Räume nicht zu groß und ein wie auch immer definiertes Bass-Verhältnis kleiner oder zumindest nicht viel größer als 1 sein sollte – ganz unabhängig von seiner Nutzungsart. Unter den meist unverrückbar vorgegebenen baulichen Gegebenheiten wäre es allerdings eine Illusion, mit entsprechenden Zahlenwerten, etwa allein aus dem Raumvolumen abgeleitet, planen zu können. Dagegen sprechen fast regelmäßig architektonische und finanzielle Randbedingungen sowie ernst zu nehmende individuelle Wünsche anspruchsvoller Auftraggeber. Dem beratenden Akustiker sollte deshalb eine möglichst breite Palette von Schallabsorbentien, insbesondere für den tiefen Frequenzbereich, zur Verfügung stehen, siehe z. B. [5, 13] mit zahlreichen dort ausgeführten Fallbeispielen, die vielerorts bereits zum Vorbild für



Abb. 12: Blick zur Flurwand eines der bemängelten Hörsäle (i14) an der TU Graz im Ausgangszustand mit einer großflächig abgehängten Akustikdecke

Unterricht und Freizeit geworden sind.

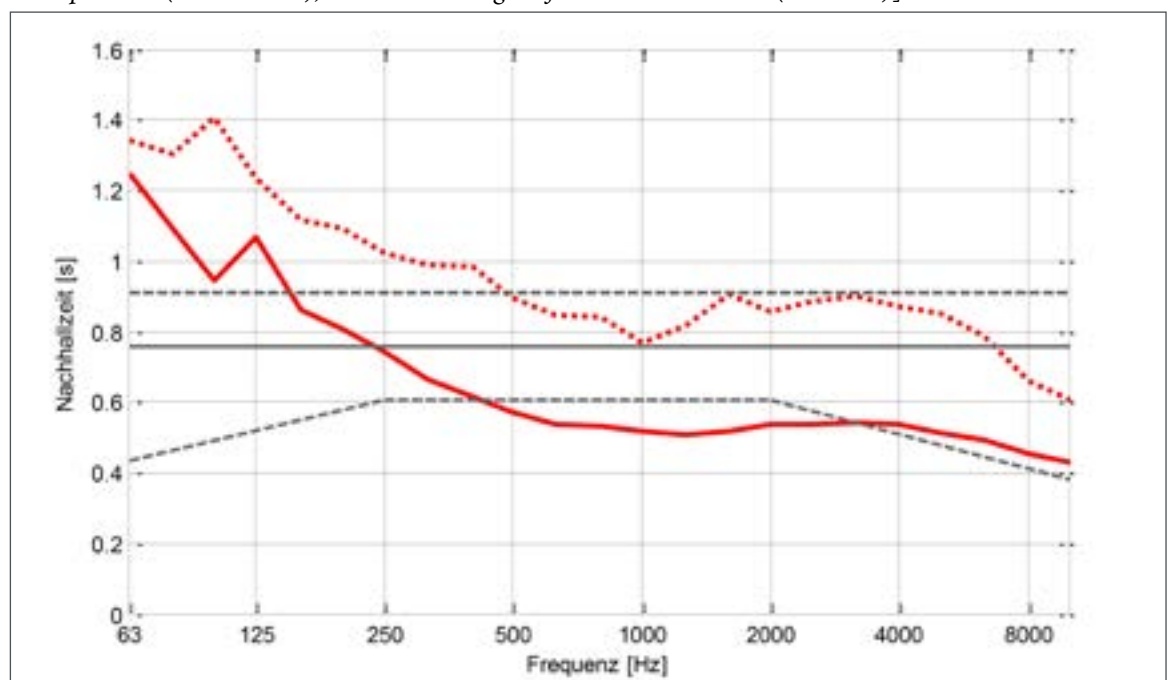
Hier sollen 3 aktuelle Fälle mit sehr unterschiedlichem BR beschrieben werden. Bei den ersten beiden geht es um etwa baugleiche, unmittelbar nebeneinander angeordnete Hörsäle der TU Graz. Beide wurden von Dozenten und Studenten wegen ihrer unangenehmen Akustik nur ungern aufgesucht, obgleich beide ganz konventionell, bereits in 1 m Abstand zur Fensterwand, mit 50 cm tief abgehängten „Akustikdecken“ aus Mineralfaserplatten ca. 3,6 m über dem schallharten Boden ausgestattet wurden.

Diese Räume wurden kürzlich im Rahmen einer Bachelorarbeit zum einen konventionell mit relativ dünnen porösen Wandpaneelen, zum anderen mit besonders kompakt gebauten Kanten-Absorbern nachgerüstet [19]. So können dort exemplarisch ein Vortrags- und Unterrichtsraum mit $BR \gg 1$ und ein fast baugleicher mit $BR \approx 1$ direkt miteinander verglichen werden. Der dritte Raum wurde mit $BR < 1$ eigens für die Stiftung Casa Acustica eingerichtet zur Demonstration optimaler Raumakustik für die naturgetreue Wiedergabe von Sprache und Musik auf höchstem Niveau [20].

Auskleidungen konventionell mit flächigen dünnen Schallabsorbern

Der 72 m² große Hörsaal i14 (Abb. 12) offenbart mit seiner Nachhallzeit in Abbildung 13 sofort das raumakustische Problem: Seine von hohen zu tiefen Frequenzen abfallende Absorption wird, wenn mit etwa 30 Personen besetzt, noch steiler. Der Raum hat der Anregung seiner Eigenresonanzen durch Geräusche von Stühlerücken und Stimmen seiner Nutzer nur wenig entgegenzusetzen. Eine solche Nachhallcharakteristik ist aber leider sehr häufig nicht nur in Unterrichtsräumen anzutreffen. Diese konventionelle Ausstattung sorgt zwar oft für die Einhaltung der Sollwerte bei mittleren Frequenzen, z. B. nach der ÖNORM B 8115-3 aus dem Jahr 2005 oder DIN 18041 von 2004, in diesem Fall $T_m \approx 0,76$ s plus maximal 20%. Aber die Werte bei 250, 125 und 63 Hz übersteigen den Sollwert um ca. 35, 62 und 77%.

Abb. 13: Nachhall-Spektren gemessen im möblierten, noch unbesetzten Hörsaal nach Abbildung 12; nur mit 50 cm tief gehängter Mineralfaser-Unterdecke (obere), zusätzlich mit 10 mittel- und hochfrequent absorbierenden porösen Wandpaneelen (untere Kurve), Toleranzbereich gemäß ÖNORM B 8115-3 (strichliert)



In diesem Raum wurden zusätzlich 10 Wandpaneele aus Akustikvlies in den Abmessungen $1,8 \times 1,2 \times 0,05 \text{ m}$, also $21,6 \text{ m}^2$, auf 3 Wände verteilt, was immerhin 30 % der Grundfläche entspricht (Abb. 14). Das so erzielte Ergebnis in Abbildung 13 kann nicht überraschen: In einem breiten mittleren Bereich zwischen 500 und 2.500 Hz unterschreitet die Nachhallzeit jetzt den Sollwert um 30 %. Bei 125 und 63 Hz beträgt die Überschreitung aber immer noch 40 bzw. 65 %. Besonders negativ für die akustische Behaglichkeit in diesem Raum wirkt sich der nun noch steilere Anstieg des Nachhalls zu tiefen Frequenzen aus, der bei Besetzung zudem noch zunimmt. Beim Betreten des Raumes fällt bei etwas Hörerfahrung sofort auf, dass der geringe Nachhall bei mittleren Frequenzen nicht den Erwartungen bei einem Raum dieser Größe entspricht. Auf tieffrequente Laute antwortet der Raum nach wie vor mit starkem Dröhnen, die Sprachverständlichkeit ist entsprechend schlecht und die Stimmanhebung bleibt.

Nachrüstung alternativ mit kompakten Breitband-Absorbern

Im Nachbarraum fügen sich 65 cm breite, vertikale und horizontale, mit Mineralwolle gefüllte Gipskarton-Koffer in die stark gegliederte Flurwand ein, siehe die Strukturen 1 bis 3 in Abbildung 15. Die GK-Lochplatten, die in einem 42 cm breiten Streifen die Unterdecken-Paneele an den beiden Querwänden auf einer Länge von jeweils 3,6 m ersetzen und mit einer 30 cm dicken Mineralwolle-Auflage versehen wurden, fallen kaum ins Auge (Abb. 16). Diese bereits vielfach in ganz unterschiedlichen architektonischen Situationen realisierten Kanten-Absorber sind sehr robust und können bei jeder Renovierung einfach mit übergestrichen werden. Jedenfalls fiel das Erscheinungsbild bei den Nutzern eindeutig zugunsten dieses sanierten Hörsaals aus.

Der eigentliche Vorteil aller hier durchgeführten Maßnahmen, die deutlich weniger als diejenigen nebenan gekostet haben, liegt aber natürlich in ihrer eindeutig besseren schalltechnischen Wirksamkeit: Die Nachhallzeit im bemängelten Zustand wies ein zu den Tiefen stark ansteigendes Spektrum auf, ganz ähnlich wie im Nachbarraum, vgl. die oberen Kurven in Abbildung 17 und Abbildung 13. Dieses wurde durch die Sanierung zwischen 100 und 4.000 Hz fast konstant auf den Sollwert von hier $0,73 \text{ s}$ ver gleichmäßig. Damit wurde die Abschätzung in der Planungsphase, die auf den Erfahrungen aus früheren Sanierungen ähnlicher Art beruht, recht gut bestätigt, siehe auch Abbildung 18. Angesichts der in kleinen Räumen stets sehr starken örtlichen Streuungen aller Messwerte bei den Tiefen sollten die Abweichungen bei 63 Hz nicht verwundern. Das Dröhnen



Abb. 14: Der Raum nach Abbildung 12 mit 10 zusätzlichen, 5 cm dicken Akustikpaneelen an drei Wänden



Abb. 15: Kanten-Absorber (1 bis 3) greifen die vorgefundene Gliederung der Flurwand (ähnlich derjenigen in Abbildung 12) auf und harmonisieren optisch mit den schallharten Pfeilern (4)

Abb. 16: Die mit einer zusätzlichen Mineralwolle-Auflage belegten GK-Lochplatten (4) ersetzen die bereits vorhandenen UD-Platten in einem 42 cm breiten und 3,6 m langen Randstreifen



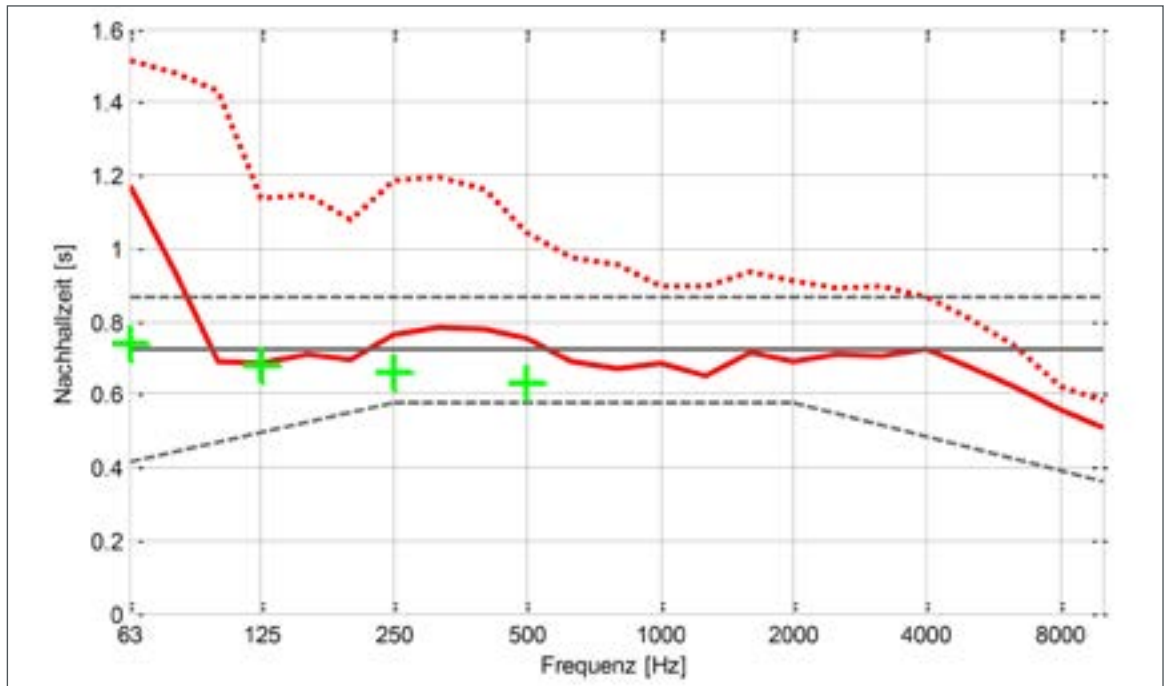


Abb. 17: Nachhall-Spektren des möblierten Hörsaals i15; nur mit 50 cm tief gehängter Mineralfaser-Unterdecke (obere), plus Kanten-Absorber nach Abbildung 15 und 16 (untere Kurve), Toleranzbereich gemäß ÖNORM B 8115-3 (strichliert) sowie Prognose (+)

ist jedenfalls wohltuend reduziert worden. Und der akustische passt hier gut mit dem visuellen Eindruck zusammen. Beide Räume stehen nunmehr für weitere psychoakustische Studien zur Verfügung.

Ausstattung eines Hörraumes mit Kanten-Absorberrn
Live- und Studioproduktionen von Musik höchster Qualität sind heute für jeden preiswert verfügbar. In der Übertragungskette vom exzellenten Künstler zum anspruchsvollen Hörer ist aber z. B. sein Wohnzimmer als „Hörraum“ längst das schwächste schalltechnische Glied, auch und gerade in Immo-

lien der oberen Preisklasse mit modern karger Möblierung. Dank zeitgemäß stereophoner Wiedergabe sind auch hier dem räumlichen Hören [12] keine Grenzen gesetzt. Voraussetzung ist allerdings, wie bei der Lösung des Lärmproblems, dass man dem Raum die Möglichkeit nimmt, das von den Lautsprechern abgestrahlte Schallfeld lokal oder spektral zu verzerren. Wiederum liegt hier die größte Herausforderung, genau wie bei den in Teil 1 [1] behandelten größeren Räumen, keinesfalls bei den mittleren und hohen, sondern eindeutig bei den tiefen Frequenzen. Um auch hierfür ein raumakustisches Konzept vorzustellen, das einfach, preiswert und ohne Einschränkung der Wohnqualität möglich ist, wurde in

Abb. 18: Grob aus den Nachhallmessungen abgeschätzter mittlerer Absorptionsgrad der nachträglich eingebauten Breitband-Schallabsorber gemäß Abbildung 15 und 16 sowie Erfahrungswerte (+)

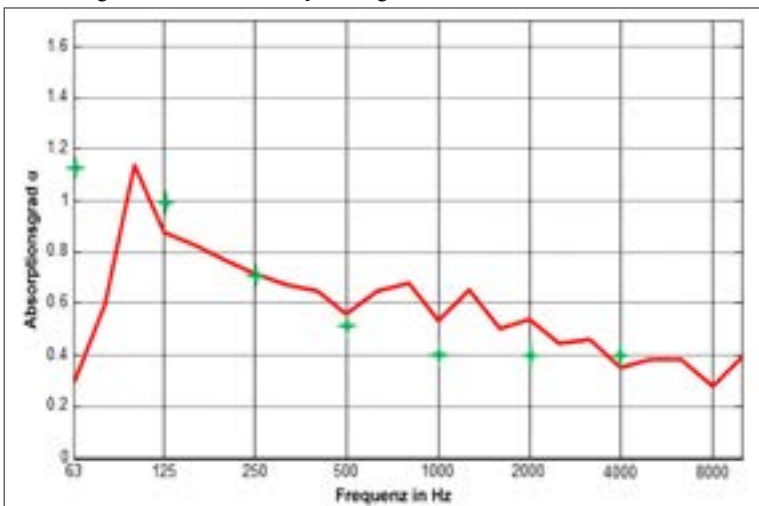


Abb. 19: Kanten-Absorber in „verdeckter“ Bauweise an Decke und einer Wand beidseitig der Stereo-Anlage sowie zwei $\lambda/4$ -Resonatoren an der gegenüberliegenden Wand im „Hörraum“ der Casa Acustica



der Stiftung Casa Acustica ein kleiner Demoraum in den Abmessungen 5 x 3,3 x 2,9 m dauerhaft eingerichtet [20]. Diesem vorgelagert sind ein normal eingerichteter Vorraum und Flur sowie ein ohrenbetäubend dröhnendes Treppenhaus. Die Besucher können also die unterschiedlichen raumakustischen Umwelten für das Verstehen, Kommunizieren und Musizieren ohne viele Erklärungen körperlich spürbar erleben und testen.

Abbildung 19 zeigt die Ausstattung mit insgesamt 4 Decken- und 2 Wand-Absorbern in den Querabmessungen 33 x 26 cm. Zwei auf die Decke/Boden-Eigenresonanz des Raumes bei ca. 60 Hz abgestimmte $\lambda/4$ -Resonatoren (siehe Pfeil) ergänzen die raumakustische Gestaltung. Durch die im ca. 12 cm breiten Decken-Hohlraum integrierte Beleuchtung können die Kanten-Absorber auch diesen bisher wohl kleinsten damit ausgestatteten Raum optisch nicht überlasten. Dessen Einrichtung besteht aus einem Teppich, einer dick gepolsterten Couch und einem dünn gepolsterten Dreisitzer in der klassischen Abhörposition. Vor der Medienwand haben auch ein Schallplattenschrank und darauf ein TV-Set Platz gefunden. Fenster und Wände blieben frei für andere lieb gewordene Funktionen, Gegenstände und Dekorationen.

Tatsächlich wird das Schallfeld durch die nur in den Raumkanten installierten Absorber nicht nur an der Abhörposition sondern überall spektral weitgehend entzerrt. Das zeigen auch die Terz-Messungen der Nachhallzeit an 3 Positionen in Abbildung 20. So

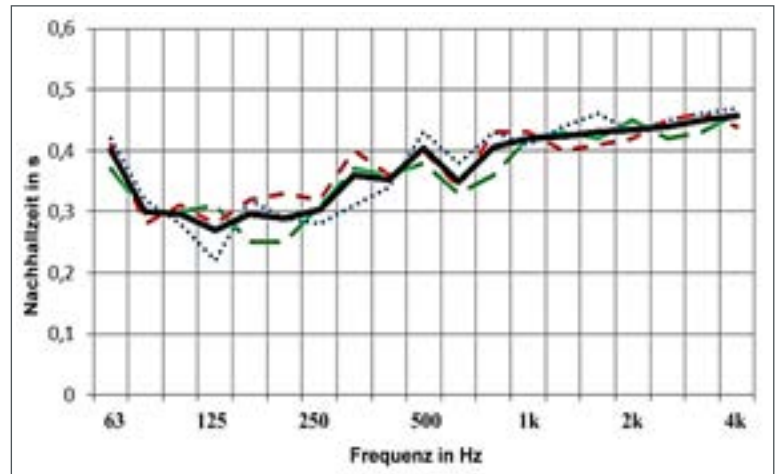
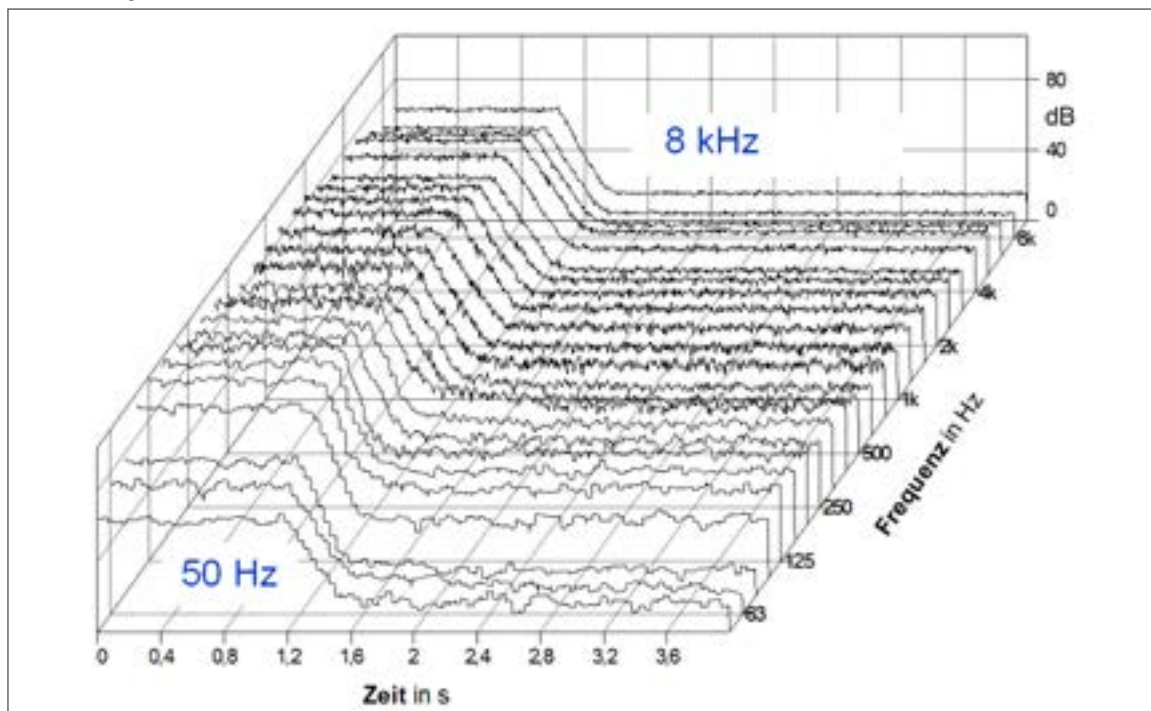


Abb. 20: In Terzen an drei Positionen sowie als Mittelwert (fett) gemessene Nachhallzeiten im „Hörraum“ von Abbildung 19

werden die ITU-R BS.1116-Empfehlungen insbesondere bei den wichtigen Frequenzen unter 250 Hz sehr gut erfüllt. Noch wesentlicher erscheint es aber, dass das zwischen 50 und 8.000 Hz gemessene Abklingen des Raumes bei jeglicher Anregung sehr gleichmäßig verläuft, siehe Abbildung 21. So wird demonstriert, dass man auch dem kleinsten Raum seinen stets nur negativen Einfluss auf die Klarheit aller in ihm stattfindenden Schallereignisse ohne besonders hohen Aufwand leicht nehmen kann.

Manch einem ambitionierten HiFi-Freak kann man jedenfalls raten, nicht sein ganzes Budget für die Abspielanlage auszugeben, sondern einen kleinen Teil davon besser in eine derartige Aufwertung der

Abb. 21: In Terzen und breitbandig (oben) zwischen 50 und 8.000 Hz gemessene Abklingkurven des „Hörraumes“ in Abbildung 19



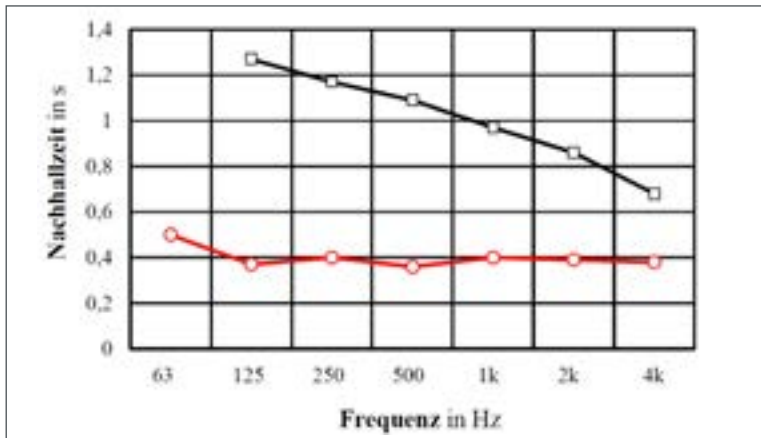


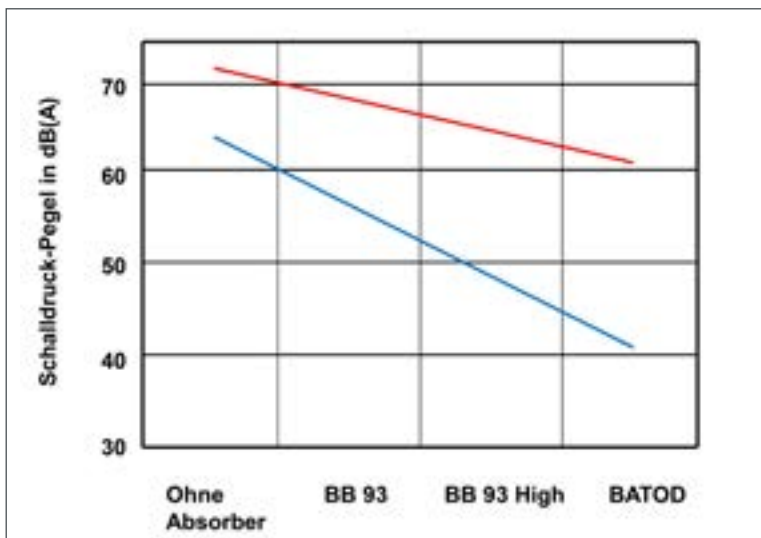
Abb. 22: Nachhallzeit eines unbesetzten möblierten Klassenzimmers mit ca. 168 m^3 gemäß Fig. 7 und Appendix A in [21] der Sweyne Park School; unbehandelt (\square), nach der Empfehlung der British Association of Teachers of the Deaf BATOD breitbandig behandelt (\circ)

Raumakustik zu investieren. Dann kann er auch beim Live-Musizieren und Kommunizieren ein ziemlich ungewohntes, aber wohltuendes akustisches Ambiente genießen. Im fortgeschrittenen Alter kann er so beim Hören von Nachrichten oder Talkshows verblüfft feststellen, dass er nun auch bei geringerer Lautstärke und ohne Hörgerät jedes Wort wieder viel besser verstehen kann, weil der tieffrequente „Mulm“ beseitigt wurde.

Der Calm-Library-Effekt

Der zuvor angesprochene „Cocktail-Party“-Effekt kann seine positive Wirkung auf die Unterhaltung in größerer Runde eigentlich nur in gut konditionierten Räumen richtig entfalten. Derartige Klassenzimmer können den Lehrer in all seinen Bemühungen fundamental unterstützen, indem sie einen breiten Spiel-

Abb. 23: Äquivalenter Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ (obere Kurve) und Grundgeräuschpegel $L_{A,90}$ (untere Kurve) für die nach unterschiedlichen Anforderungen bedämpften Klassenzimmer der Sweyne Park School nach [22]



raum für die Schallemission an den Quellen schaffen. Dieser leider noch viel zu wenig bekannte und noch weniger verstandene und erlebte pädagogische Effekt des Raumes lässt sich vielleicht vergleichen mit demjenigen, der auf eine ungehemmt plaudernde Besuchergruppe einwirkt, wenn diese aus einem lauten Ambiente in eine Bibliothek geführt wird, in der Studierende lautlos zwischen hohen Bücherregalen in Literatur vertieft arbeiten. Die zu diesem „Calm-Library“-Effekt gegenteilige Wahrnehmung kann man erfahren, wenn dieselbe oder gar mehrere Gruppen mit unvermeidlich lauten Erklärungen durch üblicherweise sehr hallige Museumssäle geführt werden. Gute Raumakustik kann also einen Beitrag zur Kultivierung von Information und Kommunikation leisten – in kleinen wie in großen Räumen.

Schlussfolgerung und Ausblick

Es gibt wohl noch wichtigere Bauregeln wie diejenigen zum Brandschutz und Wärmeschutz; aber im Vergleich zum Schallschutz etwa nach DIN 4109 führt die Raumakustik gerade in kleineren Räumen ein sehr bedauerliches Schattendasein. Da es dabei aber z.B. in Schulen um einen die Gesundheit und den Bildungserfolg erheblich gefährdenden Lärm geht, findet sich in [5, Abschn. 13.4] eine breite Diskussion entsprechender Richtlinien, die hier nur kurz ausfallen kann.

Auf DIN 18041–2004 und ÖNORM B 8115–3 wird gern Bezug genommen, da diese Normen bis 63 Hz herunter einen Anstieg von nur 20 % gegenüber der Nachhallzeit bei mittleren Frequenzen tolerieren. Im britischen Building Bulletin BB 93–2003, welches nur den Mittelwert der Nachhallzeit bei 500, 1.000 und 2.000 Hz bewertet, wird zwar mit 0,8 s für höhere Schulen und 0,6 s für Grundschulen sowie 0,4 s nach BB 93 „High“ für behinderte Schüler ein hoher Anspruch erhoben, aber leider eben nur für die mittleren Frequenzen. In einer umfangreichen Studie [21] wird aber überzeugend dargestellt, dass erst ein Ergebnis wie in Abbildung 22, das breitbandiger den Empfehlungen der British Association of Teachers of the Deaf BATOD folgt, ein geradezu überschwängliches Lob bei allen Nutzern des Klassenzimmers erhält. Tatsächlich zeigen diese Ergebnisse, dass sowohl die A-bewertete gemessene äquivalente Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ als auch die Grundgeräuschpegel $L_{A,90}$ während einer Unterrichtsstunde viel stärker sinken, als es der jeweils gesteigerten Absorption bei reduziertem Nachhall physikalisch entsprechen würde. Gemäß Abbildung 23 kann so der mittlere Störabstand für eine Stimme (meist die des Lehrers) auf bis zu 20 dB vergrößert werden – ein Segen für Lernprozesse, die auf verbal-auditiver Kommunikation beruhen, also auf Sprechen (Informieren und Erklä-

ren) und Hören (Verstehen und Verarbeiten) [22]! Dagegen würde der große Toleranzbereich in Bild 2 von DIN 18041–2016 (siehe Abb. 1 in Teil 1), wenn man ihn voll ausschöpft, einen monotonen Anstieg der Nachhallzeit um den Faktor 2,4 zulassen. Einen solchen findet man dort tatsächlich auch in dem einzigen Zitat aus der umfangreichen aktuellen Literatur zum Thema, und zwar zwischen 4 kHz (0,36 s) und 125 Hz (0,9 s)! Dazu wird in einer Fußnote nur behauptet, dies sei „aus raumakustischer Sicht akzeptabel“ (siehe Zitat [10] der Norm und dort Abb. 7.1). Auch wenn man die in [5, Kap. 12 und 14] zahlreich dokumentierten Beispiele guter Raumakustik in vorgefundenen oder sanierten Räumlichkeiten nicht als repräsentativ für die heutige Situation im Markt ansähe, kann man doch festhalten, dass diese Norm so jedenfalls nicht dem aktuellen Stand des Wissens und der Technik entspricht.

Literatur

- [1] Fuchs, H. V. (2018): Thesen zur Akustik anspruchsvoller Räume. Teil 1: Bass-Verhältnis und Hörsamkeit in größeren Räumlichkeiten. In: Akustik Journal, Nr. 2, S. 31–45, 2018.
- [2] Kuttruff, H.: Raumakustik. In: Heckl, M.; Müller, H. A. (Hrsg): Taschenbuch der Technischen Akustik, Kap. 23. Springer, Berlin, 1994.
- [3] Vorländer, M.: Raumakustik und Sprachverstehen. In: Huber, L. et al (Hrsg): Die akustisch gestaltete Schule – Auf der Suche nach dem guten Ton. Edition Zuhören, Band 3. Vandenhoeck&Ruprecht, Göttingen, 2002.
- [4] Mommertz, E.: Muss es im Unterricht immer so laut sein? In: Huber, L. et al (Hrsg): Die akustisch gestaltete Schule – Auf der Suche nach dem guten Ton. Edition Zuhören, Band 3. Vandenhoeck&Ruprecht, Göttingen, 2002.
- [5] Fuchs, H. V.: Raum-Akustik und Lärm-Minderung. Springer, Berlin, 2017.
- [6] Lazarus, H.; Sust, C. A.; Steckel, R.; Kulka, M.; Kurtz, P.: Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation. Springer, Berlin, 2007.
- [7] Davis, D.; Davis, C.: Sound system engineering. MacMillan, Indiana, 1987.
- [8] Slawin, I. I.: Industrielärm und seine Bekämpfung. Verlag Technik, Berlin, 1960.
- [9] Lombard, E.: Le signe de l'élévation de la voix. Ann. Maladies Oreille, Larynx, Nez, Pharynx 37, S. 101–119, 1911.
- [10] Bottalico, P.; Passione, I. I.; Graetzer, S.; Hunter, E. J.: Evaluation of the starting point of the Lombard effect. Acta Acustica united with Acustica 103, S. 169–172, 2017.
- [11] Meyer, J.: Akustik und musikalische Aufführungspraxis. Bochinsky, Frankfurt, 2015.
- [12] Blauert, J.: Räumliches Hören. Hirzel, Stuttgart, 1974.
- [13] Fuchs, H. V.: Schallabsorber und Schalldämpfer. Springer, Berlin, 2010.
- [14] Wu, S.; Peng, J.; Bi, Z.: Chinese speech intelligibility in low frequency reverberation and noise in a simulated classroom. Acta Acustica united with Acustica 100, S. 1.067–1.072, 2014.
- [15] Peng, J.; Wang, J.: Comparison of syllable recognition for children in low-frequency noise and white noise (in Chinesisch). J. South China Univ. Technol. 41, S. 127–130, 2013.
- [16] Mommertz, E.; Reents, P.; Graber, G.: Bedeutung kurzer Nachhallzeiten bei tiefen Frequenzen für die raumakustische Qualität in Unterrichtsräumen. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2006, 32. Jahrestagung für Akustik, Braunschweig, S. 575–576.
- [17] Peng, J.; Zhang, H.; Yan, N.: Effect of different types of noises on Chinese speech intelligibility of children in elementary school classrooms. Acta Acustica united with Acustica 102, S. 938–944, 2016.
- [18] Hellbrück, J.: Wahrnehmung und Wirkung von Schall – Akustik zwischen Physik und Psychologie. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2007, 33. Jahrestagung für Akustik, Stuttgart, S. 17–22.
- [19] Fuchs, H. V.; Graber, G.; Hetz, S.; Kordes, J.; Balint, J.: Harte Kanten für klare Worte. Trockenbau Akustik 34, H. 6, S. 70–73, 2017.
- [20] Fuchs, H. V.: High Fidelity Genuss im Wohnzimmer? VdT-Magazin 33, H. 3, S. 55–57, 2017.
- [21] Canning, D.; James, A.: The Essex Study – Optimised classroom acoustics for all. Association of Noise Consultants, St. Albans, 2012. <http://www.theanc.co.uk>
- [22] Brokmann, H.: Schulakustik und Inklusion. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 8 (2013), Nr. 5, S. 216–219. ■

**Prof. Dr.-Ing.
Helmut V. Fuchs,**
Casa Acustica,
Berlin