

Thesen zur Akustik anspruchsvoller Räume

Helmut V. Fuchs

Kompendien zur Raumakustik behandeln fast ausschließlich große Räume im Hinblick auf diverse musikalische und sprachliche Nutzungen, kaum kleine hinsichtlich Schallbelastung und Lärm durch ihre jeweiligen Nutzer. Die Fachleute sind sich eigentlich einig, dass raumakustische Qualität wesentlich durch den Direktschall der Quellen und die frühen Reflexionen aus dem Raum bestimmt wird. Es wurden daraus zwar zahlreiche Güte-Kriterien abgeleitet, aber meistens bleibt zur akustischen Kennzeichnung eines Raumes aus Zeit- und Geldmangel doch nur die Nachhallzeit übrig und leider allzu oft nur diejenige bei mittleren Frequenzen. Dabei hat dieser Parameter bei tiefen Frequenzen als notdürftiges Abbild der im Raum insgesamt vorhandenen Schallabsorption eine ganz besondere Bedeutung und ist daher ausdrücklich Gegenstand dieses Beitrages. Weil die jeweilige Nachhall-Charakteristik, insbesondere für ein sehr häufiges und stets kritisches Bassverhältnis $BR > 1$, aber bei kleinen und großen Räumen zu ganz unterschiedlichen Phänomenen führt, werden diese hier getrennt mit durchaus gleich starken Herausforderungen aber ganz unterschiedlichen Problemlösungen behandelt. Bei den großen (in Teil 1) wird dabei der verbreiteten Vorstellung widersprochen, dass tieffrequenter Nachhall für akustische „Fülle“, „Wärme“ und „Umhüllung“ bei Darbietungen sorgen müsse und deshalb z.B. viel mitschwingendes Holz zu vermeiden sei. Und wenn es etwa an solchem Nachhall fehle, solle man diesem z.B. durch ein „assisted resonance system“ elektroakustisch nachzuhelfen versuchen. Bei den kleinen (in Teil 2) wird in einer z. Zt. besonders heiß geführten Diskussion dezidiert Stellung bezogen, die durch eine Norm angefacht worden ist, die sogar Werte $BR \gg 1$ toleriert. Aus beiden Anwendungsfeldern für eine zeitgemäße Akustik werden Musterräume besprochen, die alternative Ansätze für ein anzustrebendes $BR \leq 1$ rechtfertigen können. Ein gravierender Unterschied zwischen kleinen und großen Räumen wird dabei allerdings bleiben: Über die Pegelminderungen z.B. in Klassenzimmern kann man eigentlich kaum streiten, über die Akustiken z.B. in Konzertsälen aber sehr wohl und mit Leidenschaft!

Propositions for the acoustics of pretentious rooms

Textbooks on room acoustics preferably concentrate on the suitability of larger rooms for various musical and lingual uses rather than on smaller ones with respect to noise caused by their respective users themselves. Experts seem to agree that acoustic quality mainly depends on the direct sound emitted from the sources and the early reflections from the room's boundaries. Numerous quality criteria were thus derived, yet due to lack of resources and time the reverberation time is mostly left as the only parameter and regrettably just that at the medium frequencies. As this parameter, as an indigent image of the total sound absorption incorporated in the room, has a very special meaning at the lower frequencies, this paper will explicitly address this specific aspect. Bass ratios $BR > 1$ are frequently found to cause critical situations with rather different characteristic phenomena created in large and small rooms. As these require different solutions, both problem areas with equally strong challenges are treated separately here. For larger rooms some propositions are at variance with common convictions that low-frequency reverb would be necessary to create 'volume', 'warmth', and 'envelopment' in performances and that therefore vibrating wooden paneling should mostly be avoided and when such reverb were missing, one should try and compensate for it e.g. by installing an electro-acoustical 'assisted resonance system'. For smaller rooms a decisive opposition is formulated against a recently released standard which tolerates values $BR \gg 1$. For both fields of application representative examples are discussed which could lead to alternative approaches to advisable bass ratios $BR \leq 1$. One fundamental difference between small and large rooms will, however, quite obviously remain: Noise level reduction in e.g. classrooms is almost indisputable; acoustical quality in e.g. concert halls, on the other hand, will always continue to evoke enthusiastic disputes.

Einführung

Im Schallschutz ringen Schalltechniker um jedes dB, um die Belastungen z. B. an lauten Arbeitsplätzen oder Verkehrswegen in durch zahlreiche Richtlinien streng vorgegebenen Grenzen zu halten. Wenn die spektrale und zeitliche Emissions-Charakteristik der jeweiligen Quellen bekannt ist, steht dem Akustiker auch eine breite Palette von Schall lenkenden, dämmenden und dämpfenden Bauteilen praxis- und marktgerecht zur Verfügung. Er weiß auch, dass man mit der Lärmbekämpfung am wirksamsten an den Quellen selbst ansetzt.

In der Raumakustik geht es primär darum, nützliche Schallereignisse möglichst klar und deutlich zur Geltung, d. h. zu Gehör zu bringen, z. B. Sprache in Theatern, Hörsälen und Klassenzimmern oder Musik in Konzertsälen, Studios und Proberäumen. In großen Räumen spielt die Schalllenkung, in großen wie in kleinen Räumen aber vor Allem das Spektrum und die Verteilung der Schallabsorption im Raum eine wichtige Rolle. Dabei sind dem Akustiker jedenfalls in größeren Räumen unvermeidliche Schallabsorber durch die Architektur sowie die Bauweise, Baumaterialien, Möblierung und Belegung mit Personen weitgehend vorgegeben. Wenn dieser es nicht ganz seinem oft außerordentlich selbstbewusst agierenden Baumeister oder dem Zufall überlassen will, muss er seine Planung mit einem einigermaßen verständlichen, berechenbaren und messbaren Konzept begründen und am besten solche Maßnahmen vorschlagen, die nicht nur physikalisch sondern auch psychisch auf die Schallemission der agierenden Quellen positiv einwirken.

Für die raumakustische Planung existieren, ganz anders als z. B. für die Bauakustik oder den technischen Schallschutz, bis heute leider keine allgemein verbindlichen Normen oder Richtlinien. Ein Grund für dieses Dilemma ist, dass es für diese akustische Qualität, Hörsamkeit in oder Nutzbarkeit von Räumen, zwar eine Fülle von Voraussetzungen, Kriterien und Maßnahmen gibt, von denen nur einige in Tabelle 1 aufgeführt sind. Weitere kann man in [1] finden. Auch führt die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure die raumakustischen Planungsaufgaben genau so detailliert und umfangreich auf wie die bauakustischen. Aber B. Blesser et al. [2] beschreiben sehr treffend und unterhaltsam, dass „*architects almost exclusively consider the visual aspects of a structure. Only rarely do they consider the acoustic aspects*“. Auch Innenarchitekten folgen gern einem ausschließlich visuellen Konzept, wie es von R. Schricker [3] sehr subjektiv, naiv und gefühlsbetont mit Hunderten herrlicher Bilder, aber keiner einzigen objektiv nachvollziehbaren raumakustischen Kennzeichnung propagiert wird. Demnach gäbe man einem Raum seine

Qualität schon, „*wenn man der visuellen Ästhetik eine ästhetische Akustik hinzufügt*“, die keiner Rechnung oder Messung zugänglich sei.

Dazu passend, verbreitet ein aktuell so überaus renommiertes Akustiker wie Y. Toyota (verantwortlich u. v. a. auch für die Elbphilharmonie in Hamburg und den Pierre-Boulez-Saal in Berlin) eine ziemlich fatalistische Einstellung z. B. in Die Welt vom 23.2.2012: „*Es gibt sehr große Unterschiede zwischen den physikalischen Berechnungen und dem tatsächlichen Höreindruck während eines Konzerts, der das Wahrnehmen von Musik ganz anders bewertet. Und wir rechnen während unserer Arbeit natürlich nicht mit Musik. Es ist so gut wie unmöglich, diese beiden Dinge miteinander zu vergleichen. Wie bewertet man Qualität mit Zahlen? Das ist unmöglich*“. Oder in Der Spiegel 26.2016: „*Mit dem Whisky ist es so wie mit der Akustik: Selbst Experten können nicht erklären, warum der eine gut schmeckt und der andere nicht*“.

So wird leider der Eindruck erweckt und bestärkt, bei der Akustik gehe es weniger um eine bautechnische Aufgabe als um eine geheimnisvolle Zufälligkeit im großartigen Baugeschehen. Dabei hat W. C. Sabine [4] bereits vor Zeiten einen entscheidenden physikalischen Parameter dingfest gemacht und diesen in seine Planung für die Symphony Hall in Boston (siehe weiter unten) eingeführt, die zweifellos zu den besten der Welt zählt. Seitdem ist die Nachhallzeit die wichtigste Kenngröße, deren Zahlenwerte man für die meisten namhaften Auditorien in Standardwerken wie dem von L. L. Beranek [5] (allein dort etwa 100) studieren und als Maßstab heranziehen kann. Für ein großes weltweit operierendes Beratungsbüro wie Nagata Acoustics [6] ist es eigentlich selbstverständlich, für alle (wohl an 50) selbst geplante Säle stets wenigstens das erzielte Nachhall-Spektrum zu veröffentlichen. Es fehlt also nicht an Daten aus existierenden großen Räumen für Sprache und Musik.

Wie alle Fachleute in seltener Übereinstimmung über die verschiedenen Qualitäts-Kriterien meinen, muss immer die Nachhallzeit und deren Frequenzabhängigkeit (wenigstens in Oktaven zwischen 125 und 4.000 Hz) im Vordergrund stehen. Diese Einschätzung von L. Cremer et al. [7] teilen Praktiker heute noch: „*Auch als man erkannte, dass sie nicht den einzigen Gütemaßstab darstellen konnte und als immer wieder neue Kriterien ergänzend angeboten wurden, blieb sie die einzige Größe, für die in Lehr- und Taschenbüchern Richtwerte angegeben wurden. Dies liegt vor allem daran, dass die Nachhallzeit auch heute noch das einzige Kriterium darstellt, das bei der Planung verhältnismäßig einfach, wenn auch nicht sehr genau, an Hand von Plänen und Materialangaben vorausberechnet werden kann. Kein verantwortungsbewusster Berater wird daher darauf verzichten, ihre Werte abzuschätzen*“.

Schon damals hielt man übrigens Abschätzungen bis zur 63-Hz-Oktave herunter für wichtig, doch gab es „hierfür kaum zuverlässige Angaben über die einzusetzenden Absorptionsgrade“ [7, S. 491].

Nachdem eine ganze Palette von universell einsetzbaren Breitband-Absorbern verfügbar und in unzähligen Fallbeispielen erprobt wurde [8], steht aber heute einer Bewertung des Nachhalls nach

$$T(f) = 0.163 \frac{s}{m} \frac{V}{A_s(f) + A_e(f) + A_p(f) + 4V m(f)} \quad (1)$$

im gesamten relevanten Frequenzbereich gemäß Tabelle 1 nichts mehr im Wege, wobei das Volumen in m^3 und alle äquivalenten Absorptionsflächen A im Raum (S für Begrenzungsflächen, E für Einrichtungen, P für Personen) in m^2 sowie die Dämpfungskonstante m in m^{-1} einzusetzen sind. In DIN EN ISO 3382-2000 [9] heißt es: „Diese internationale Norm

beschreibt auch weiterhin die raumakustischen Eigenschaften durch die Nachhallzeit allein“. Andere objektive Kriterien wie in Tabelle 1 werden dort in einen (nur informativen, d. h. unverbindlichen) Anhang A verwiesen. Oder wie J. S. Bradley [10] über [11] schreibt: „It is still a reverberation time standard“. Eine aktuelle Würdigung von I. B. Witew [12] aller weitergehenden Bemühungen der letzten 50 Jahre stellt „einen noch fehlenden Zusammenhang zwischen subjektiver Wahrnehmung und objektiven Messgrößen“ sowie oft sehr widersprüchliche Ergebnisse aus diversen Fragebogen-Auswertungen fest.

In [8, Abschn. 11.6] wird ausführlich die Meinung zur optimalen Bedämpfung anspruchsvoller Räume von G. v. Békésy, E. Skudrzyk, F. Trendelenburg, W. Reichardt, L. Cremer, H. Kuttruff bis in die frühen 30er Jahre zurückverfolgt, wonach die entsprechende Nachhallzeit in kleinen wie in großen Räumen,

Tabelle 1: Raum-Akustik: ein schlecht markiertes Spielfeld, (siehe Abb. 2), x = irrelevant

	große Räume Hörsamkeit	kleine Räume Störabstand
Standard-Voraussetzungen (weitgehend vorgegeben):		
Direktschall / Richtcharakteristik der Quellen		
Frühe Reflexionen aus der Umgebung	$\Delta t < 200 \text{ ms}$	x
Nachhall des Raumes	$\Delta t > 200 \text{ ms}$	x
Subjektive Kriterien (schlecht nachvollziehbar):		
Anhall / Präsenz	?	x
Fülle / Brillanz	?	x
Wärme / Umhüllung	?	x
Objektive Kriterien (einigermaßen messbar):		
Stärke G / Pegelverteilung ΔL in dB, $\Delta t = 0-80 \text{ ms}$	$f \approx 500-1.000 \text{ Hz}$	x
Klarheit C_{80} / Deutlichkeit C50 in dB, $\Delta t = 0-50 \text{ ms}$	$f \approx 500-4.000 \text{ Hz}$	x
Seitenschall S_s in dB, $\Delta t = 5-80 \text{ ms}$		
Nachhallzeit, T(f) in s	f = 63-4.000 Hz	
Bauliche Maßnahmen (gut plan- und realisierbar):		
Entfernung vom Zuhörer $\Delta L(x) \geq 20 \lg x$	„Schuhkarton“/„Weinberg“	x
Sichtlinien	„Schuhkarton“/„Weinberg“	x
Schalllenkung	$f \approx 500-4.000 \text{ Hz}$	x
Schallabsorption ($\rightarrow T(f)$ in s)	f < 250 Hz	f \approx 63-500 Hz

für Sprache wie für Musik, zu den Tiefen nicht ansteigen, vielmehr dorthin abfallen sollte. Dem widerspricht die aktuelle DIN 18041 [13] diametral. Dort liest man zwar: „ist in der Regel ein linearer frequenz-abhängiger Verlauf für die Nachhallzeit anzustreben. Jedoch beeinträchtigt ein moderater Anstieg zu tiefen Frequenzen die Hörsamkeit nicht.“ Gemäß Abbildung 1 dürfte die Nachhallzeit demnach von den höchsten bis zu den tiefsten Frequenzen kontinuierlich ansteigen – zum Leidwesen aller Nutzer besonders von kleinen aber auch von größeren Räumen, die vielleicht in bester Absicht nach einer Norm behandelt wurden, die so kaum baurechtlich bindend sein kann.

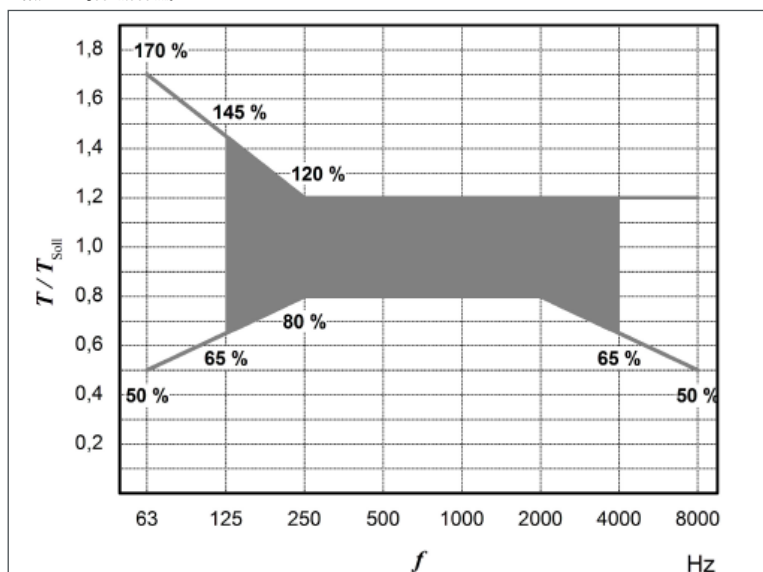
Seit gut 50 Jahren stand zwar ein fast sakrosanktes Dogma im Raum, das für Musik generell einen Anstieg der Nachhallzeit zu den Tiefen postulierte. Es war L. L. Beranek, der in [14] ein Bass-Verhältnis („Bass Ratio“)

$$BR = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1000}} \quad (2)$$

mit den Nachhallzeiten T bei 125 und 250 Hz bzw. 500 und 1.000 Hz (immer für den besetzten Raum) ursprünglich als ein Qualitäts-Kriterium insbesondere für Konzertsäle definierte. Dieses sollte Werte zwischen 1,1 (für Räume mit hoher) und 1,5 (für Räume mit niedriger mittlerer Nachhallzeit) betragen mit der noch in [5, S. 21-38] in seinen „acoustical quality factors“ hoch gehaltenen Begründung: *“If the surfaces of the walls or ceilings or seats absorb the low frequencies, the full orchestra may sound deficient in basses and cellos ... A hall lacks warmth when the reverberation times are lower at low frequencies (75 to 350 Hz) than at mid-frequencies (350 to 1.400 Hz),*

Abb. 1: Toleranzbereich des Nachhalls, bezogen auf einen Sollwert

$T_{soll} = T_{500-1.000\text{ Hz}}$ nach [13, Bild 2]



i. e. a low BR“.

Dagegen sprechen Interferenzen der Schallwellen bei tiefen Frequenzen, die für die Klarheit von Musik wie für die Deutlichkeit von Sprache stets sehr destruktiv wirken, die sich aber in großen Räumen ganz anders als in kleinen ausbilden. Deswegen und weil es in kleineren Räumlichkeiten primär eher um Schallbelastungen, ausgedrückt z. B. durch den Störabstand, geht als um Hörsamkeit, findet die Diskussion dazu, auch anhand von jeweils repräsentativen Fallbeispielen, in zwei getrennten Artikeln statt. In beiden stehen die Nachhall-Spektren im Vordergrund, aber eigentlich nicht wegen des Nachhalls im Raum sondern als notdürftiges Abbild der entscheidenden Absorption an seinen akustisch relevanten Reflexionsflächen und -körpern.

Teil 1:

Bass-Verhältnis und Hörsamkeit in größeren Räumlichkeiten

In Teil 1 geht es vor Allem um architektonische Unikate, deren optische Gestaltung, wie einem höheren künstlerischen Anspruch folgend, regelmäßig weit vor der akustischen rangiert. Dazu die Meinung eines allseits respektierten Akustikers [15, Abschn. 23.4.2]: *„Für einen Konzertsaal kommt es nicht darauf an, dass der Zuhörer die zeitliche Struktur der dargebotenen Musik in allen Einzelheiten verfolgen kann, vielmehr entspricht eine gewisse zeitliche Verschmelzung aufeinanderfolgender Töne und Klänge den überkommenen Hörgewohnheiten und ist daher für einen Konzertsaal unerlässlich. Entsprechendes gilt für die räumliche Auflösung der Schallereignisse. Dass ein Orchester eine beachtliche räumliche Ausdehnung hat und die einzelnen Instrumentengruppen sich an verschiedenen Stellen des Podiums befinden, ist zwar unvermeidlich, soll vom Zuhörer aber nicht eigentlich ‘gehört’ werden. Die akustischen Eigenschaften des Saals und auch die Gestaltung des Podiums müssen also eine gewisse zeitliche und räumliche Vermischung der Schalle bewirken. Hierzu gehört in erster Linie eine hinreichend lange Nachhallzeit. Da es für das Ausmaß der anzustrebenden Verschmelzung keine objektiven Anhaltspunkte gibt, können optimale Bereiche der Nachhallzeit nicht aus Signal- und Höreigenschaften abgeleitet werden.“* Aber viele seiner Kollegen, die Musik ähnlich integrierend wahrzunehmen gewohnt sind, meinen, sie sollte in Konzertsälen zu den tiefen Frequenzen besser ansteigen als abfallen ($BR > 1$). Dem gegenüber wird hier der Klarheit von Musik und Deutlichkeit von Sprache höchste Priorität eingeräumt und dem Nachhall immer nur bei mittleren und hohen Frequenzen ein positiver Einfluss auf das Gehörte zugesprochen, so als wolle man Noten und Text eher differenzierend, fast wie in einer Partitur oder einem Textbuch mitlesend, hören.

Interferenzen bei tiefen Frequenzen durch frühe Reflexionen

Gute Sichtlinien zwischen allen Sendern und Empfängern sind stets auch Voraussetzung für eine passable Akustik und deshalb auch ein Argument für oder gegen eine Grobstruktur wie z. B. „Schuhkarton“ vs. „Weinberg“. Die Planung größerer Räume basiert üblicher Weise auf geometrischen Ansätzen [15, Abschn. 23.1.3]: „Sprache, Musik, Geräusche haben fast immer ein sehr breites, meist auch ein zeitlich schnell wechselndes Spektrum. Überlagern sich in einem Punkt zwei oder mehrere Schallstrahlen, die ja im Allgemeinen unterschiedliche Laufwege zurückgelegt haben, so können die auf ihnen übertragenen Schallsignale als inkohärent angesehen werden, d. h. alle Phasendifferenzen können außer Betracht bleiben, und die in dem betreffenden Punkt vorliegende Energiedichte ist die Summe der Energiedichten der einzelnen Komponenten (Energieaddition). Die geometrische Raumakustik beschränkt sich demgemäß allein auf die Energieausbreitung im Raum“. Und so tun es auch die heute gebräuchlichen Spiegelquellen- und Strahlverfolgungs-Rechenprogramme [16, Kap. 11]. Dies setzt voraus, dass die Abmessungen reflektierender Flächen und die Laufwegunterschiede sich überlagernder Wellen groß sind im Vergleich zur Wellenlänge. Dies ist wiederum nur bei hohen und mittleren Frequenzen der Fall, auf die sich viele Auslegungen tatsächlich auch gern konzentrieren, z. B. bei der Bestimmung von Stärke-, Klarheits- und Deutlichkeitsmaßen als Verhältnis der Energieanteile von frühen zu den späteren Reflexionen, die nach Abbildung 2 und [18, Bild 4.59], abhängig vom Raumvolumen V in m^3 , etwa nach einer Laufzeit-Differenz Δt_{gr} in ms,

$$\Delta t_{gr} / ms \approx 2 \sqrt{V / m^3} \quad (3)$$

schließlich im Nachhall des Raumes aufgehen.

Für die Wahrnehmung und Lokalisierung einer oder auch mehrerer Quellen ist der Direktschall stets von besonderer Bedeutung. Alle später beim Hörer eintreffenden Schallwellen können diese Hörsamkeit bei mittleren und hohen Frequenzen aber nur dann ohne Verzerrung des Klangbildes unterstützen, wenn das Gehör entweder bei kleiner Laufzeitdifferenz ($\Delta t \ll T_f = \text{Periodendauer}$) bzw. Laufwegdifferenz ($\Delta x \ll \lambda = \text{Wellenlänge}$) zwischen direkter und reflektierter Welle nicht unterscheidet (siehe Tabelle 2, blaue Zahlen) oder bei $\Delta t \gg T_f$ vor dem Eintreffen der ersten Reflexionen genügend Zeit zur Wahrnehmung und Lokalisierung der Quelle hatte (siehe Tabelle 2, grüne Zahlen).

Für 1.000 Hz entsprechend einer Periodendauer $T_f = 1$ ms bzw. Wellenlänge $\lambda = 0,34$ m heißt dies z. B., dass diese energetische Unterstützung im Ab-

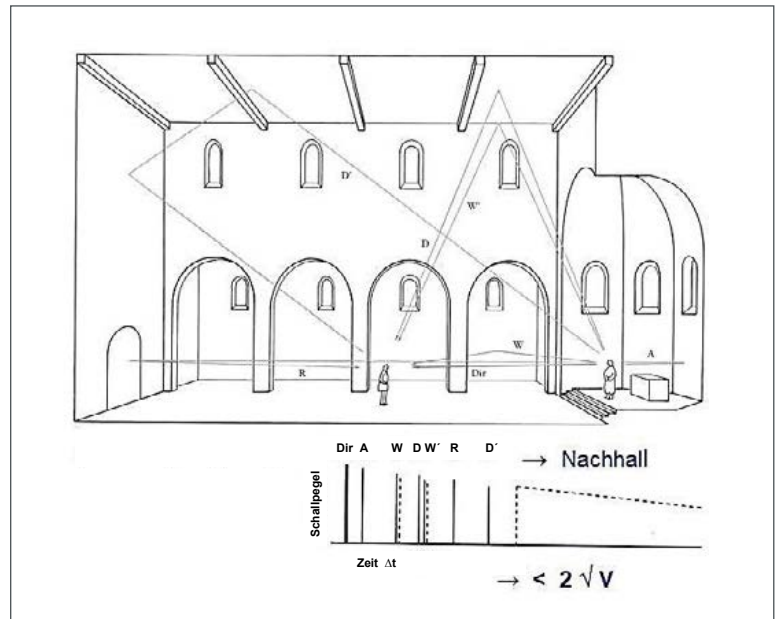


Abb. 2: Aufbau des Schallfeldes aus Direktschall, frühen Reflexionen und späterem Nachhall nach [17, Bild 2.6]

stand x von der Quelle, abhängig von der Pegeldifferenz

$$\Delta L_x = 20 \lg \frac{x + \Delta x}{x} \quad , \quad (4)$$

praktisch durch jede frühe Reflexion stattfindet. In [19] wird am Beispiel einer Kugelquelle aber veranschaulicht, wie bei Frequenzen unter 250 Hz, abhängig von der Wegdifferenz Δx , bei $\Delta t / T_f \approx 1$ direkte und reflektierte Wellen destruktiv interferieren können (siehe Tabelle 2, rote Zahlen). Diese Erscheinung erinnert etwas an den von Studio-Räumen bekannten „Kammfilter“-Effekt, wie er z. B. in [20, Abschn. 3.2.2.3] beschrieben wird. In größeren Auditorien kann sie beim Hörer einen tieffrequenten „Mulm“ anstelle eines markanten Bass-Fundaments erzeugen. Dagegen hilft keine Verdopplung der Anzahl der Bass-Instrumente, stattdessen aber ihre Aufstellung vor einer großen reflektierenden Rückwand, siehe den blau markierten Bereich in Tabelle 2 und die Ausführungen in [21]. Ganz wirkungslos, sogar kontraproduktiv, wäre aber eine Anhebung des Nachhalls zu den tiefen Frequenzen hin, also $BR > 1$. Im Gegenteil: alle reflektierenden Flächen an Decke und Wänden, wie in Abb. 2 beispielhaft angedeutet, sollten die tiefen Frequenzen möglichst stark absorbieren!

Wenn raumakustische Mängel von dauerhaft aktiven oder passiven Nutzern der Räumlichkeit mit Nachdruck beanstandet werden, beschränken sich Besserungsversuche meist nur auf zusätzliche Schalllenkende Maßnahmen. Bei Bau- und Sanierungsvorhaben wird dagegen noch viel zu wenig auf die von vorn herein richtige Bedämpfung des Raumes geachtet.

Tab. 2: Laufzeit-Differenz Δt bzw. Laufweg-Differenz Δx im Verhältnis zur Periode T_f bzw. Wellenlänge λ von direkter und reflektierter Schallwelle bei der Frequenz f nach [19]

f [Hz]	λ [m]	T_f [ms]	Δx [m] Δt [ms]	1 2,9	2 5,8	4 12	8 23	16 46	32 92
$\Delta t / T_f = \Delta x / \lambda$									
16	22	63		0,05	0,09	0,18	0,37	0,73	1,5
31	11	32		0,09	0,18	0,37	0,73	1,5	2,9
63	5,5	16		0,18	0,37	0,73	1,5	2,9	5,9
125	2,8	8		0,37	0,73	1,5	2,9	5,9	12
250	1,4	4		0,73	1,5	2,9	5,9	12	23
500	0,7	2		1,5	2,9	5,9	12	23	46
1k	0,3	1		2,9	5,9	12	23	46	92
2k	0,2	0,5		5,9	12	23	46	92	184
4k	0,1	0,25		12	23	46	92	184	368

Eine systematische Untersuchung dieser Fragestellung an 77 Mehrzweckhallen [22] hat ergeben, dass ein etwas anders definiertes Bass-Verhältnis

$$BR = \frac{3}{2} \frac{T_{63} + T_{125}}{T_{500} + T_{1000} + T_{2000}} < 1 \quad (5)$$

von Musikern und Toningenieuren gleichermaßen als optimal für Darbietungen wie für Aufnahmen angesehen wird, ausführlicher in [8, Abschn. 11.7.7]. Eine andere Studie [23] kommt zu dem Schluss: "... this study indicated that the perceived strength of bass sound was not related to the (relativ hohen, der Autor) low frequency reverberation times but to the levels or strength of the low frequency sound". Schließlich schreibt auch der Urheber des $BR > 1$, der dieses einst in seine "orthogonal acoustical attributes that relate to the acoustical quality of concert halls" aufgenommen hatte, in seinem letzten Buch, dass er "found unexpectedly that it is immediately apparent that $BR (> 1)$, der Autor) does not correlate strongly with the rating categories ..." [24, S. 512].

In den Worten eines erfahrenen Tonmeisters, der diese Entwicklung seit den 30er Jahren miterlebt hat, klingt das so: „It is the direct sound which carries the message to the listener! The reflected sound only ‘suits’ it and lets the sound ‘flow’... A ‘slim’ hall (with little reverberation in the bass range) helps to ‘read’ the fundamental structures in the bass range which are so essential for all compositions of value. A space with great bass reverb, however, will rather hamper the desired transparency in the low ranges, although unassuming concert goers may be happy with the voluminous but

unstructured ‘bass clouds’ they can have in such halls. This second variety is more frequent, because until very recently there was no scientific knowledge to judge room acoustics in any other but a purely quantitative manner, just considering the amplitudes ... Recognizing the musical structure and architecture in the contra- and sub-contra ranges is just as important as doing it for the formants. Acousticians deal with just one aspect so far and that is ‘enveloping’ the listener in concert with ‘warm’ and ‘rich’ quantities of ‘space feeling’. All the better, if it comes across transparent enough!" [25, Kap. 12]

Wie bei den Parametern Pegelverteilung, Deutlichkeit und Klarheit bezieht man sich heute durchaus ungenügend auch bei der Charakterisierung des Nachhalls eines Raumes oft nur auf den Bereich zwischen 500 und 1.000 Hz, so auch im Fall der Elbphilharmonie [26]. Im Übrigen herrscht die in [8, Abschn. 11.6] ausführlich zitierte Lehrmeinung vor, dass eine zu den Tiefen ansteigende Nachhallzeit für die Darbietung insbesondere romantischer Musik förderlich sei. Darüber hinaus meint man, für gute Hörsamkeit sei der Nachhall im besetzten Saal ausschlaggebend. Am besten bilde man diese schon im unbesetzten Raum durch ein entsprechend gepolstertes Gestühl nach. Zu den nützlichen wie zu den eher schädlichen frühen Reflexionen tragen alle Publikumsflächen aber kaum bei, weil diese auch den hier überwiegend streifend einfallenden Direktschall bis zu tieferen Frequenzen hin relativ stark absorbieren. Zwar bestimmen sie den Nachhall bei den mittleren Frequenzen, aber nicht bei den tiefen. Dieser Umstand kann erklären, warum es Säle mit ganz un-

terschiedlicher Nachhall-Charakteristik gibt, denen eine exzellente Akustik nachgesagt wird. Nur wenn man die Absorption der für die so entscheidenden frühen Reflexionen nicht relevanten Publikumsflächen herausrechnet, indem man in Gleichung 1 A_p und A_E unberücksichtigt ließe, käme man einer Nachhallzeit als Qualitätskriterium näher. Ganz anders verhält es sich bei einem Saal wie dem in der Jesus-Christus-Kirche, in dem seit jeher nur ungepolsterte Kirchenbänke anzutreffen waren. Und hier bestätigt sich die obige These besonders deutlich, indem der Raum bei jeder Belegung, also ganz unterschiedlicher Absorption bei mittleren und hohen Frequenzen, doch stets in gleicher Weise von Musikern, Sprechern und Zuhörern für seine exzellente Akustik gerühmt wird. Aber auch dem Musikvereinsaal wurde vor wie nach seiner Ausstattung mit einem stärker gepolsterten Gestühl und seiner dadurch entsprechend veränderten Nachhall-Charakteristik doch stets eine gleichbleibend herausragende Qualität nachgesagt. Man hat auch nicht gehört, dass sich die Wiener Philharmoniker bei den Proben in ihrem leeren Saal etwa unwohler fühlen würden als im voll besetzten Saal. So erklärt sich vielleicht auch, warum „variable Akustik-Maßnahmen“, etwa wie im Kultur- und Kongresszentrum Luzern, die ebenfalls üblicher Weise nur im mittleren Frequenzbereich wirken, sich nur selten wirklich nützlich gemacht haben.

Räume mit besonderer Akustik

Jesus-Christus-Kirche in Berlin

Der Autor betrachtet die außen wie innen architektonisch ganz unspektakuläre Kirche mit ihrer Nachhallzeit gemäß Abbildung 3 ($BR \approx 0,67$ bzw. $0,59$ nach Gleichung 2 bzw. 5) als einen akustisch nicht zu übertreffenden Musterraum für die Darbietung und Aufnahme von jeglicher Musik und Sprache. Und darin wird er von Rednern, Instrumentalisten, Sängern, Tonmeistern und Konzertbesuchern immer wieder bestätigt. Auch Teilnehmer einer Exkursion während der DAGA 2010 [28] konnten sich von der herausragenden Akustik dieses Raumes bei Sprache und Musik überzeugen. Dabei ist dieses Ergebnis aus dem Jahr 1931 nicht etwa einer besonders akribischen raumakustischen Planung, sondern, ganz ohne Vorplanung oder Nachbesserung, einzig einem glücklichen Zufall und einem den Argumenten seines Akustikers (J. Biehle) gegenüber völlig uneinsichtigen Architekten (J. Bachmann) zu verdanken. Man kann aber verstehen, dass sich nach [29] der mit der Akustik betraute C. Biehle im Jahre 1930 „immer mit äußerst großen Bedenken mit dem raumakustischen Zustand der Kirche“ befasst hat: „Die durchgeführte Berechnung hat ergeben, dass der Raum für rednerische und sogar auch für musikalische Zwecke zunächst völlig

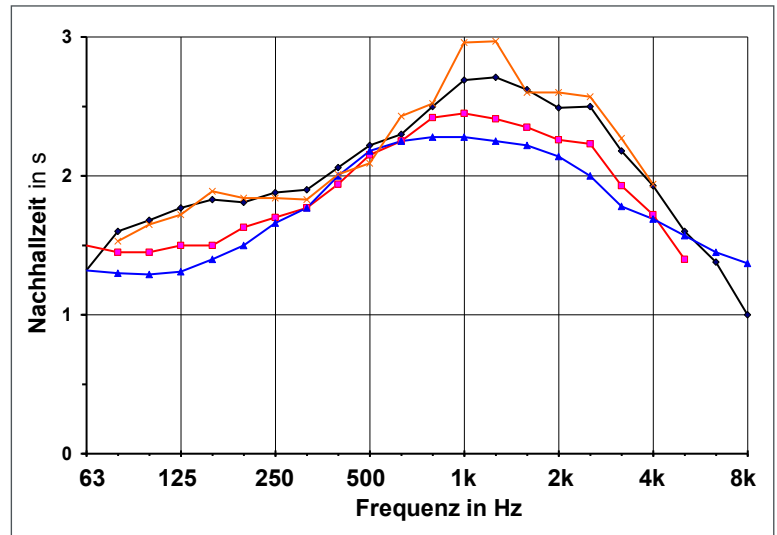


Abb. 3: Nachhallzeit in der ca. 8.000 m³ großen Jesus-Christus-Kirche, gemessen zwischen 1952 und 1963 bei unterschiedlicher Bestuhlung und Besetzung mit Musikern nach [27]

unbrauchbar sein wird. Der Kubikinhalte möchte möglichst verkleinert werden, am einfachsten durch starkes Senken der Decke ... Die Schwierigkeiten der hier zu lösenden Aufgabe liegen in dem Umstande, dass das Volumen des Kirchenraumes im Verhältnis zur Sitzplatzzahl in einem ungünstigen (zu großen, der Autor) Verhältnis steht.“

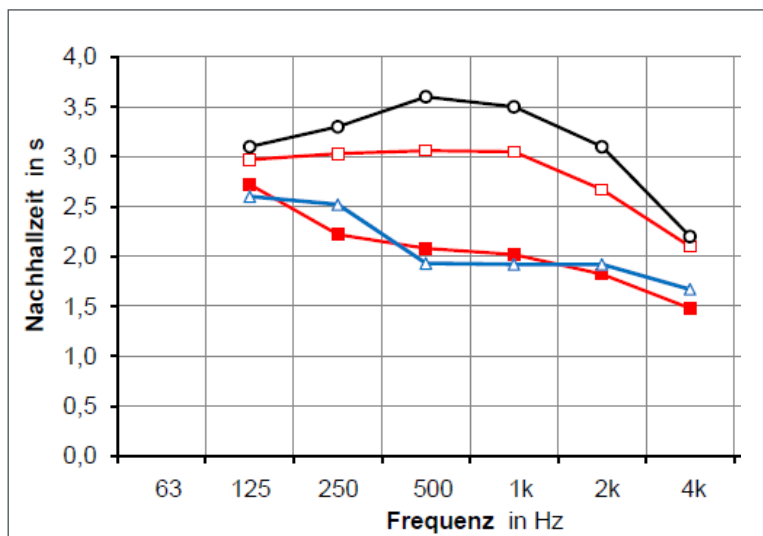
Dass J. Biehle sich mit seinen ernsthaften Bemühungen und ungewohnt selbstbewussten Forderungen stets – wie noch heute manche Akustiker – nur auf die mittleren Frequenzen konzentriert hat, geht auch aus seinen Gutachten hervor: „Da eine flache Decke den künstlerischen Absichten des Architekten entgegensteht, war es mein Bestreben, die Flächen des Satteldaches möglichst dämpfend auszubilden ... Zwischenrippen einzufügen ... kam ich auf eine Vermehrung der Lamellen. Indessen genügt bei Weitem nicht diese Maßnahme ... Für 500 Personen wird selbst bei einem phonetisch geschulten Prediger die Hörsamkeit fraglich werden; bei 300 Personen, welche Zahl als Durchschnitt angegeben wurde, ist eine Verständlichkeit der Rede nicht mehr zu erwarten ... ist als Maßnahme vorzusehen, dass die Kanzel in die Ecke des Saales verlegt wird ... Mir selbst ist der Bau wegen der Ungewöhnlichkeit der Anlage Gegenstand ständiger Sorge“ [29].

Diesem Bestreben, den Nachhall zwischen 500 und 1.000 Hz zu optimieren, sollten wohl die 15 bis 30 cm breiten Lamellen im Abstand von etwa 15 cm unter der inneren Dachhaut dienen. Ob auch die ca. 2 cm breiten Schlitze in der Holzverschalung selbst aus schalltechnischen Gründen oder nur zu deren „Hinterlüftung“ vorgesehen waren, bleibt im Dunkeln. Der nicht näher beschriebene, insgesamt etwa 50 cm tiefe Hohlraum zwischen innerer und äußerer Dachschalung dahinter wurde, wohl zur Wärme-

dämmung, mit einer Art Holzfaserplatte (nur ca. 5 cm dick!) hinterlegt. Entgegen den Befürchtungen waren alle Verantwortlichen und Nutzer sofort von der Akustik der neuen Kirche begeistert. In [30] liest man: „Die akustischen Fragen hat J. Biehle mit bestem Erfolg bearbeitet“. Erst 1990 wurde das Rednerpult aus der Raumecke neben den Altar verlegt – ohne Verlust an Sprachverständlichkeit (auch ohne elektroakustische Verstärkung!). Aber bereits kurz nach dem Krieg würdigte der Tonmeister P.K. Burkowitz bei Aufnahmen in diesem wohl einzigen fast unbeschädigt gebliebenen größeren Saal Berlins dessen besondere Exzellenz: „Das Besondere im Klang der Aufnahmen aus der Kirche ist ihre auffällige Transparenz, 'luftige', vom Hintergrund abgehobene Präsenz aller Klangbestandteile, eine hochgradige klangästhetische Nachhallqualität ohne Verwischungen oder Maskierungen, trotzdem hervorragende, akustisch-*'sanghafte'* Bindung chorisch notierter Instrumentengruppen, besonders der Streicher, fest kontinuierte, nicht wie in vielen anderen Sälen mulmig dröhnend ineinanderfließende tiefe Lagen, und kernige, klare *'betonfeste'* Bässe.“ Bald darauf nutzten aber auch die Berliner Philharmoniker mit W. Furtwängler diesen Raum trotz all seiner damaligen Notdürftigkeit wegen seiner überragend guten Akustik. Nach [29] „gab es fortan von Kammermusik bis Sinfonieorchester nichts, was irgendwo sonst schöner klang“. Es folgten weltweit beachtete Aufnahmen mit großem Orchester und Chor unter H. v. Karajan, C. Abado, S. Rattle u. v. a. Aber auch gefeierte Solisten wussten und wissen den Raum für Konzerte wie für Aufnahmen zu schätzen, z. B. E. Gilels mit Beethoven-Sonaten.

Seine offenbar auch ohne besondere Einbauten

Abb. 4: Nachhallzeiten gemessen im Musikvereinssaal ($V = 15.000 \text{ m}^3$), unbesetzt mit alter Bestuhlung (vor 1960) (○), mit neuen $n = 1.680$ Sesseln (□), jeweils nach [24, S. 594] und besetzt (■) sowie in der alten Berliner Philharmonie ($V = 18.000 \text{ m}^3$, besetzt) (△) nach [31, Bild 3]



optimale Diffusität und Nachhall-Charakteristik hat dieser Raum mit allen original erhaltenen oder behutsam restaurierten Kirchen der Barockzeit gemeinsam, die nach [17, Abschn. 4.3 und 4.5] „zu einem hohen Maß an Deutlichkeit und Durchsichtigkeit“ führt. Und auf S. 154 schreibt derselbe Autor: „Unter dem Gesichtspunkt der Verdeckung der für die Deutlichkeit und Brillanz maßgeblichen höheren Frequenzen durch starke tieffrequente Klanganteile ist einer zu tiefen Frequenzen hin abfallenden Nachhallkurve gegenüber einem Anstieg der Vorzug zu geben“.

Musikvereinssaal in Wien

Ambitionierte Akustiker haben nicht nur die mittleren Frequenzen im Blick und nehmen gern den allseits gerühmten Musikvereinssaal in Wien mit einem zu den Tiefen vermeintlich notwendigen Nachhall-Anstieg als großartiges Vorbild. Sie sehen dabei den besetzten Saal als maßgeblich und deshalb ein entsprechend gepolstertes Gestühl als ratsam an, obwohl alle Publikumsflächen, besetzt oder unbesetzt, wegen ihrer Ausrichtung und Absorption kaum zu den für die Hörsamkeit überaus nützlichen frühen Reflexionen beitragen. Wenn also der Nachhall neben der offensichtlich sehr hohen Diffusität in diesem Saal, wie zu Recht vermutet, entscheidend für seine akustische Exzellenz ist, so sollte man einmal dessen Spektrum ohne eine dominante Absorption bei mittleren Frequenzen durch Personen oder Gestühl etwas näher betrachten: Gemäß Abbildung 4 hatte der Raum aber mit einem früher relativ harten Gestühl unbesetzt tatsächlich sein Nachhall-Maximum von 3,5 s nicht etwa bei tiefen Frequenzen sondern zwischen 500 und 1.000 Hz ($BR < 0,9$, besetzt $BR \approx 1$ nach Gleichung 2). Würde man die mutmaßliche Absorptionsfläche dieses Gestühls nach [32, Tafel 9] mit ca. $0,15 \text{ m}^2$ pro Sitzplatz in Abzug bringen, so würden die verbleibenden Reflexionsflächen als Absorber bei einem Volumen von 15.000 m^3 zu $T_m > 5 \text{ s}$ und damit zu einem noch steileren Abfall zu den Tiefen führen – ähnlich wie im etwa halb so großen Raum von Abbildung 3 mit seiner kargen Kirchen-Bestuhlung.

Das um 1960 eingebaute, etwas stärker gepolsterte Gestühl führt im unbesetzten Zustand gemäß Abbildung 4 zu einer zwischen 125 und 1.000 Hz konstanten Raumdämpfung, und erst bei voller Besetzung stellt sich heute tatsächlich eine zu den Tiefen kontinuierlich ansteigende Nachhallzeit ein. Zu allen Zeiten und bei beliebigen Besetzungen und Darbietungen hat aber dieser Saal nicht nur mit seinem Gold, sondern auch mit seiner Akustik bei Musikern wie bei Zuhörern brilliert. Die beiden von L. L. Beranek [5, 24] ebenso hoch gepriesenen Säle im Concertgebouw in Amsterdam [24, S. 425 und 611] und Sym-

phony Hall in Boston [24, S. 47 und 586] (eröffnet 1888 bzw. 1900) weisen bis 1982 unbesetzt eine von 1.000 Hz abwärts konstante bzw. sogar leicht abfallende Nachhall-Charakteristik auf, siehe Abbildung 5. Eine Restaurierung 1982 in Boston hat sogar zu einem von 2.000 bis 125 Hz stark abfallenden Nachhall geführt, der bei voller Belegung vergleichmäßig wird. Das spricht für die hier vertretene These, dass man an den für frühe Reflexionen besonders nützlichen Wand- und Deckenflächen unbedingt stets für ausreichende Bass-Absorber sorgen sollte, so wie dies 2001 im Neubau des Großen Hauses des Staatstheaters in Mainz konsequent realisiert werden konnte [33].

Berliner Philharmonie

Dieses von seiner äußeren wie inneren Erscheinung (Abb. 6) schon vor seiner Eröffnung 1963 als geradezu revolutionär angesehene Bauwerk mit $V = 26.000 \text{ m}^3$ und $n \approx 2.300$ Plätzen wurde von allen hinzugezogenen Akustikern (darunter auch L. L. Beranek) während seiner Planung durchaus lautstark als akustisch äußerst riskant eingestuft, siehe [8, Abschn. 11.8.4]. Nachdem es aber von Musikern und Zuhörern durchweg begeistert aufgenommen und später in [24, S. 297] sogar als „one of the models of successful acoustical designs“ geadelt wurde, diente seine „Weinberg“-Struktur bei zahlreichen später errichteten Konzertsälen ebenso häufig wie der „Schuhkarton“ (s. o.) als leuchtendes Vorbild, wenngleich nach [24, S. 500] nicht immer so erfolgreich: „A number of terraced, surround halls have been built, though none have been as acclaimed as the Berlin Philharmonie“.

In einem sehr löblichen Gegensatz zu den meisten ähnlich spektakulären Neubauten hat der hier verantwortliche Akustiker sofort nach dessen Eröffnung

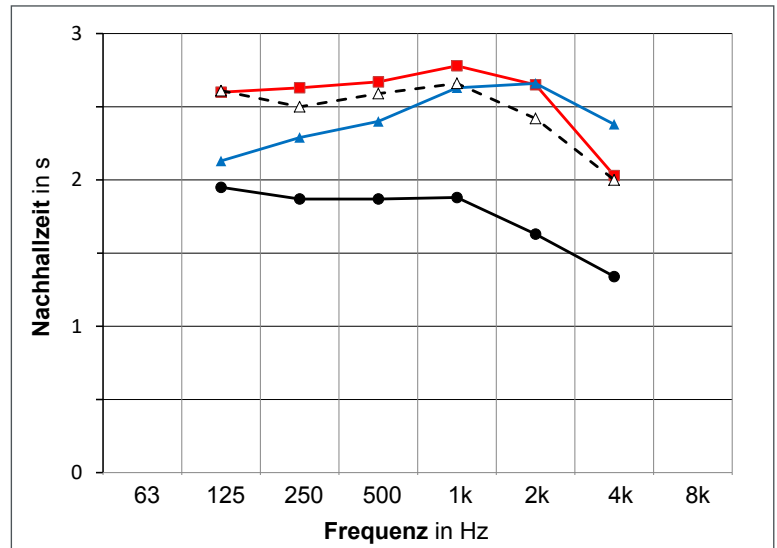
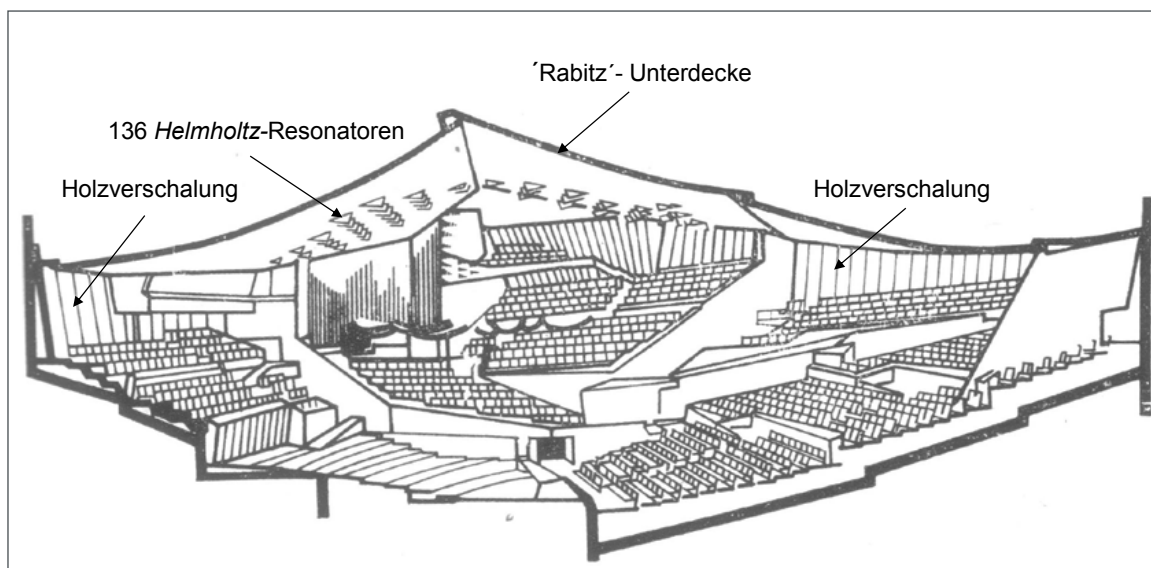


Abb. 5: Nachhall-Spektren der Symphony Hall in Boston ($V = 8.750 \text{ m}^3$, $n = 2.625$), unbesetzt vor 1982 (■) bzw. nach 1982 (▴) und besetzt (●) sowie im Concertgebouw in Amsterdam ($V = 18.780 \text{ m}^3$, $n = 2.037$) unbesetzt (▲)

alle seine Planungsdetails den späteren Messergebnissen gegenübergestellt und freimütig veröffentlicht. Aus [31] kann man z. B. herauslesen, dass auch L. Cremer sich, wie allgemein üblich, zunächst auf die Nachhallzeit bei 500 bis 1.000 Hz konzentriert hat. Er berichtet aber zugleich von „sorgfältiger ingenieurmäßiger Abschätzung“ der eingeplanten Absorption, „wobei wir bei hohen Frequenzen wissen wollten, welche niedrigsten Werte (der Nachhallzeit, der Autor) wir zu befürchten hatten, bei den tiefen welche höchsten“. In einem ersten Schritt wurde das Volumen auf besagte 26.000 m^3 , d. h. auf probate 11 m^3 pro Platz, angehoben und die zeltartig konvex gekrümmte Decken-Konstruktion gefunden. Aus [31, Bild 7] kann man indirekt auf die prognostizierte und die tatsäch-

Abb. 6: Der große Saal der Berliner Philharmonie in einem perspektivischen Schnitt nach [32, Bild 10.47]



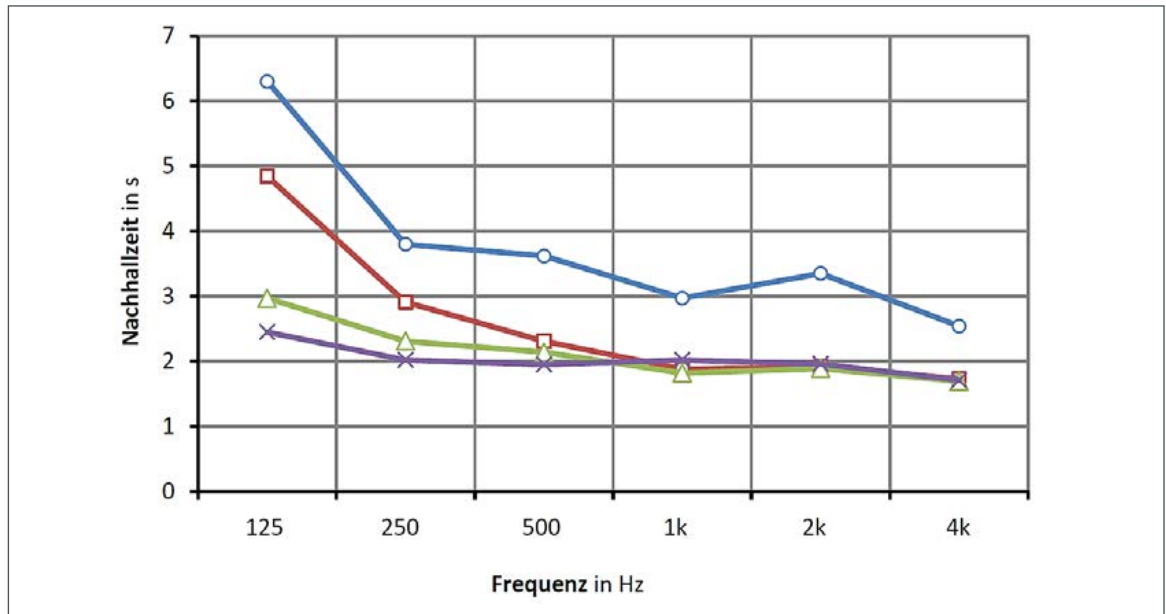


Abb. 7: Nachhallzeit-Spektren im Saal nach Abb. 6, errechnet aus Daten in [31]; unvermeidliche Absorption plus 2.200 gepolsterte Sitze (o), plus Publikum (□), plus Tiefen-Absorber (Δ) und tatsächlich gemessen (x)

lich erreichte Nachhallzeit (dort Bild 5) schließen, siehe Abbildung 7. Als unvermeidliche Absorption berücksichtigte die Planung u. a. Luftauslässe unter den Sitzen, als Tiefen-Absorber eine leichte, teilweise perforierte Holzverschalung vor einem unterschiedlich hinterlegten Luftkissen an den oberen Wandflächen sowie 136 Helmholtz-Resonatoren unter der Decke.

Die beiden unteren Kurven in Abbildung 4 zeigen den in [31, Bild 3] eigentlich angestrebten Anstieg des Nachhalls zu den Tiefen ($BR \approx 1,2$). Die unterste Kurve in Abbildung 7 offenbart aber, dass dieser nicht zustande kam. Dies ist wohl der riesigen, leichten, vielfach unterbrochenen, nur 12 bis 15 mm dicken Rabitz-Decke (Mörtelputz auf einem Drahtgeflecht) zu verdanken, die meterweit von der unteren Betondecke abgehängt wurde. In einer gewissen Analogie zum Baugeschehen der Jesus-Christus-Kirche wurde hier also, wiederum glücklicherweise, ein hinter der großen Deckenfläche verborgener „Tiefenschluckler“ bei der raumakustischen Auslegung übersehen oder unterschätzt, der aber von Anfang an mit für eine gute Nachhall-Charakteristik dieses Saales gesorgt hat. Dass eine solche Deckenkonstruktion tatsächlich vom Schallfeld zum Mitschwingen angeregt wird, wurde drastisch offenbar, als 1988, also nach 25 Jahren intensivster Bespielung, ein ca. 1 m² großes Stück des Putzes auf das Podium herunterfiel. Daraufhin wurde die gesamte Decke, weiterhin unter den Augen von L. Cremer, durch eine leichte Betonschale ersetzt, die aber dauerelastisch von ihrer stabilen Unterkonstruktion abgehängt wurde. An der gleichmäßigen Nachhall-Charakteristik hat diese behutsame Sanierung so nichts geändert.

Ebenso hervorzuheben sind auch die vielen schalllenkenden Maßnahmen wie die seitlichen und frontalen Brüstungen und die konvex gewölbten Reflektoren über dem Podium sowie die von den Terrassen erzeugte Makro- und (von L. Cremer so genannte) Mikro-Diffusität im Raum. Zu den stärksten Befürwortern der Berliner Philharmonie gehören bis heute die darin arbeitenden Musiker. Über die optischen und akustischen Eigenheiten jeder „Surround“-Struktur im Auditorium kann man natürlich, besonders im Hinblick auf das Direkt-Schallfeld, trotzdem geteilter Meinung sein.

Elbphilharmonie in Hamburg

Für die jüngste, nach 14 Jahren Planungs- und Bauzeit am 11.1.2017 mit großem Pomp eröffnete „Weinberg“-Architektur (siehe Bilder in [37]) sind, im Gegensatz zu [31] oder [33], auch 16 Monate danach kaum aussagefähige raumakustische Daten veröffentlicht. In [6, 26] geben die verantwortlichen Akustiker nur einen viel versprechenden Wert von 2,4 s für die Nachhallzeit bei 500 Hz im unbesetzten Saal preis. Als mögliche Erklärung dieser Zurückhaltung kann man lesen: „Critical assessments and judgments about the excellence or failings of a concert hall’s acoustics do not come from people reading data sheets with reverberation time and other numerical measurements of physical properties. Ultimately, individuals seated in audience seats listen to performers playing music on the stage and the audience, by listening to the music, evaluates and judges the acoustics“ [26].

Solche und ähnliche Äußerungen zeugen noch nicht von einem erprobten verlässlichen Konzept, das die hier ganz enormen Ausgaben für Akustik rechtferti-

gen könnte. Über die aus der Raumform in [37] erkennbare Makro-Diffusität braucht man tatsächlich kein Wort zu verlieren. Die auffällige „Weiße Haut“ mit einer muschelartig feinstrukturierten Oberfläche an Decke und Wänden, die für eine angemessene Reflexion und Streuung der Schallwellen sorgen soll, überspannt auf 6.000 m² die Decke und alle Wände ([37], letztes Bild). Sie wurde aus 10.287 individuell gefertigten glasfaserverstärkten Gipsplatten mit einem mittleren Flächengewicht von 125 kg/m² extra schwer gemacht, „because we needed these panels to have sufficient weight to effectively reflect sound even at low frequencies“ [26]. Nach ihrem „Erfinder“, dem Architekten B. Koren, wurden in die Haut ca. 1 Million muschelartige Vertiefungen, alle individuell 10 bis 90 mm tief mit einem mittleren Durchmesser von 80 mm nach einem „kalkulatorischen Meisterwerk“ (Focus 5.2017), den Anforderungen der Akustiker gehorchend, gefräst. Sie sollen nach [26] „serve the role of promoting acoustical diffusion for the hall’s acoustics“. Dies kann aber nach [34] wohl nur im höheren kHz-Bereich gelungen sein.

Die teils sehr nebulöse, teils ungewöhnlich euphorische Berichterstattung fast aller Akteure in den Monaten vor und nach der Eröffnung ließ reichlich Raum für Spekulationen, bisher natürlich vorwiegend in den populären Medien. In [35] wird von einem Phono-Experten, etwas zurückhaltend, resümiert: „Nur in einem Punkt herrscht Einigkeit: Der Klang ist klar, hell, durchsichtig und direkt“. Der Counter-Tenor des Eröffnungskonzerts P. Jaroussky lobt: „Es klingt sehr warm und sehr klar ... Hier habe ich das Gefühl, eine sehr große Stimme zu haben – das ist unglaublich“. Der Chefdirigent des Orchesters meint: „Dieser Saal ist anders als alle anderen ... phänomenal ... ein Wunderwerk“, spricht von Wucht und Transparenz der Musik und dass er nach der ersten Probe Tränen in den Augen seiner Musiker habe glänzen sehen. Auch der Orgelbauer und die erste Organistin überschlugen sich öffentlich vor Begeisterung.

Worauf dieser tatsächlich von vielen Nutzern bestätigte Klangeindruck zurückzuführen ist, erscheint diesen, wie oft jede Akustik, geheimnisvoll. Über die „interior design materials“ heißt es in [26] leider auch nur, dass sie „include not only the materials and finishes that are visible to the eye, but also the structure and properties of the underpinnings and backings of every interior element“. Dabei lohnt unbedingt ein Blick auf die Stahl-Unterkonstruktion der „Weißen Haut“. Man kann sicherlich kaum exakt berechnen, bei welchen Frequenzen diese Konstruktion als Feder zusammen mit den daran über U-Profile befestigten Gipsplatten als Massen von den auftreffenden tieffrequenten Schallwellen zum vielfältigen Mitschwingen und so zum breitbandigen Absorbieren

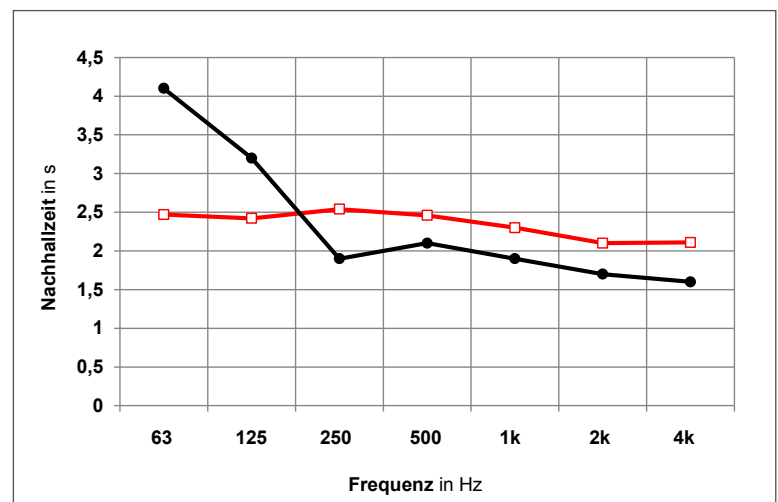
angeregt wird. Aber es erscheint sehr wahrscheinlich, dass sich nur so ein unerwartet gleichmäßiges Spektrum wie in Abbildung 8 mit einer Nachhallzeit von nur 2,5 s bei 63 Hz ergeben konnte. Unbestätigt war für den Saal mit einem Volumen $V = 23.000 \text{ m}^3$ und einer insgesamt 8.500 m² großen Oberfläche für 2.100 Sitzplätze angeblich ein zu den Tiefen hin stark ansteigender Nachhall gemäß Abbildung 8 (BR $\approx 1,3$ bzw. 1,9) geplant, wie er für die vielen von Nagata Acoustics bearbeiteten Konzertsäle durchgehend charakteristisch ist.

Um auf maximal ca. 4 s für die Elbphilharmonie zu kommen, hat man wahrscheinlich einen mittleren Absorptionsgrad der Flächen von ca. 0,1 bei 63 Hz zugrunde gelegt. Behält man diesen in einer Nachrechnung nur für die 2.500 m² außerhalb der „Weißen Haut“ bei, so verbleibt nach W. C. Sabine (natürlich nur sehr näherungsweise) eine äquivalente Absorptionsfläche von immerhin 1.250 m², die der Innenschale zugerechnet werden kann. Der daraus sich ergebende Absorptionsgrad von etwa 0,2 ist durchaus vergleichbar mit dem in der Planung üblicherweise z. B. für Fenster, Spiegel, Parkett (auf Leisten hohl liegend) nach [36, Tab. 4.9] angenommenen.

Vergleich mit anderen Sälen

Fast gleichzeitig mit der Elbphilharmonie wurde an der Staatsoper Berlin der Pierre-Boulez-Saal mit $V = 7.615 \text{ m}^3$ für $n = 682$ fertiggestellt. Hier hat dasselbe Büro Nagata Acoustics die erzielten Nachhallzeiten ohne jede Geheimniskrämerei der Öffentlichkeit freimütig mit $T = 3 \text{ s}$ bei 63 Hz (BR $\approx 1,4$ bzw. 1,6) in diesem viel kleineren Saal präsentiert, siehe Abbildung 9. Da die bereits vorhandene Decke der Rohbaustanz zu hoch erschien, wurde – wie G. Steinke aus einer Führung am 19.8.2017 berichtet – zunächst

Abb. 8: Nachhallzeit im Großen Saal der Elbphilharmonie; unbestätigte Prognose für den besetzten Saal (●), 2016 gemessen im unbesetzten Saal (□) (Quelle: [38])



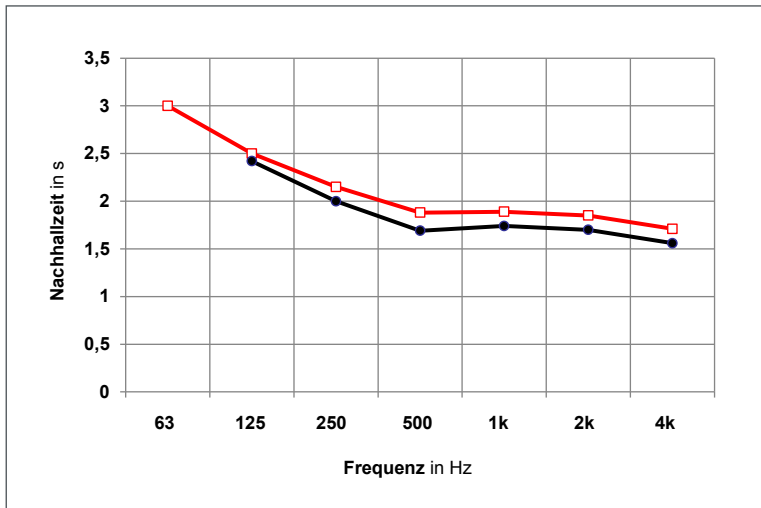


Abb. 9: Nachhallzeit im Pierre-Boulez-Saal in Berlin; gemessen im unbesetzten Saal (□), im besetzten Saal (●) (Quelle: [39])

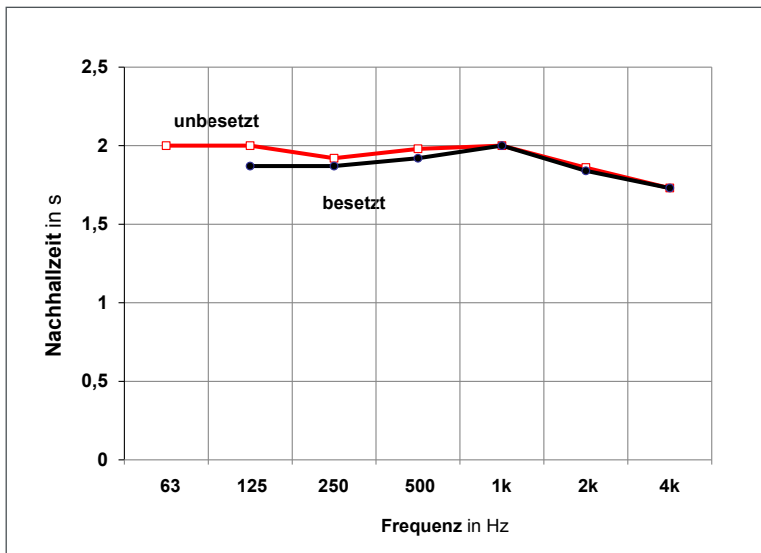
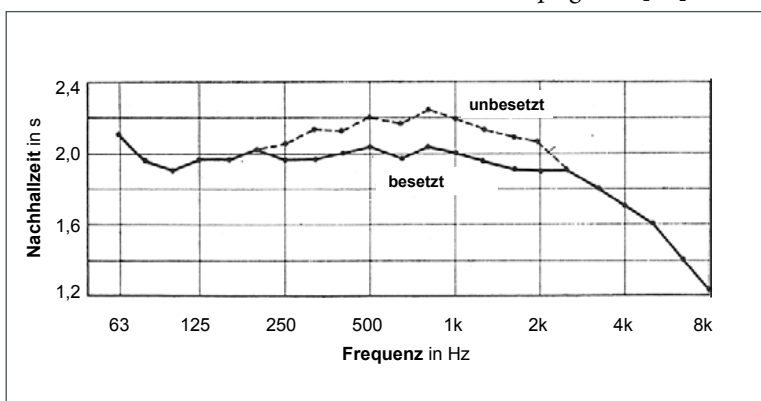


Abb. 10: Nachhallzeit in der Jinji Lake Concert Hall in Suzhou (Quelle: [40])

Abb. 11: Nachhallzeit im Neuen Gewandhaus in Leipzig nach [32]



eine leichte Holzdecke etwa 3 m tief abgehängt, siehe [39], Seite 1 unten. Um aber deren im Sinne des hier propagierten Konzepts durchaus nützlichen Tiefen-Absorption entgegenzuwirken, wurden 20 Tonnen Beton auf diese Unterdecke aufgetragen, was den offenbar unbedingt gewollten Tiefen-Anstieg in Abbildung 9 erklären kann. Hier ging das entgegengesetzte Auslegungskonzept des Akustikers (Y. Toyota) offenbar besser auf als in Hamburg, aber nach Meinung des Autors nicht zum Vorteil für die Akustik.

Im selben Jahr wurde aber auch ein Konzertsaal mit $V = 9.600 \text{ m}^3$ für $n = 509$ und einer „Weißen Haut“ aus fächerartigen glasfaserverstärkten Gipsplatten als Vorsatzschalen an den Wänden von Nagata Acoustics dokumentiert mit einer Nachhall-Charakteristik (Abb. 10) wiederum ganz ähnlich derjenigen in Hamburg. Aber auch im viel größeren Neuen Gewandhaus in Leipzig aus dem Jahr 1981 mit $V = 24.500 \text{ m}^3$ für $n = 2.230$ findet man im besetzten Zustand eine zwischen 1.000 und 63 Hz fast konstante Nachhallzeit und unbesetzt ein breites Maximum bei den mittleren Frequenzen, siehe Abbildung 11.

Im Rückblick von der Gegenwart bis in die Renaissance trifft man ebenfalls auf viele berühmte Räumlichkeiten mit einer ausgeglichenen, ohne Publikum oder dick gepolstertes Gestühl sogar zu den Tiefen abfallende Nachhall-Charakteristik: Da ist zunächst die schon erwähnte Symphony Hall in Boston mit $V = 8.750 \text{ m}^3$ für $n = 2.625$, die bei aller nach dem Vorbild des Alten Gewandhauses in Leipzig gestalteten raumakustischen Qualität den Unterschied zwischen unbesetzt und besetzt besonders deutlich werden lässt, siehe Abbildung 5.

In der Barockzeit boten nur die Kirchen größere Räume für die Darbietung von Musik und Gesang. Ganz unabhängig vom Raumvolumen sorgen hier die meist holzverkleideten Wände, Decken und Nischen stets für ausreichend Tiefen-Absorption (siehe Abb. 12), die besonders für die Transparenz polyphoner Musik eigentlich unverzichtbar ist, wie in [8, Abschn. 11.7.5] ausgeführt wird. Zur nur 6.900 m^3 großen Bachkirche in Arnstadt liest man z. B.: „... ergibt sich die barocke Nachhallkurve par excellence, die auch durch ein Maximum um 1.000 Hz geprägt wird ... Da die Personen vorwiegend mittlere und hohe Frequenzen absorbieren, baut sich bei einer vollen Besetzung des Kirchenschiffs das Nachhallmaximum ab und es bildet sich eine über einen weiten Bereich frequenzneutrale Nachhallzeit aus, die mit Werten um 2 s dem Klang volle räumliche Entwicklungsmöglichkeiten und andererseits bei einer klaren und hellen Färbung zu einem hohen Maß an Deutlichkeit und Durchsichtigkeit der klanglichen Zeitstrukturen führt. Dies wird noch durch die kurze Einschwingzeit der Basslagen unterstützt, die aus der kurzen Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen re-

sultiert. Auch wenn zusätzlich die Emporen voll besetzt sind, entsteht nur ein schwacher Anstieg der Nachhallkurve bis in den Bereich um 250 Hz; es tritt also auch hier keine Hervorhebung der Tiefen auf“ [17].

Im Teatro Olimpico in Vicenza aus dem Jahr 1584 (Abb. 13) findet man eine Wiedergeburt der klassischen Amphitheater unter einem geschlossenen Dach. Aber auch hier entdeckt man, wegen großflächiger Holzverschalungen vor Allem im Bühnenbereich nicht weiter überraschend wiederum die hier favorisierte Absorptions- bzw. Nachhall-Charakteristik.

Schlussfolgerung und Ausblick

In akustisch anspruchsvollen Auditorien geht es stets vor Allem darum, Musik oder/und Sprache möglichst klar und deutlich von den Sendern zu den Empfängern zu übertragen. Dabei spielen der Direktschall und Reflexionen von Decke und Wänden sowie von eigens für mittlere und hohe Frequenzen installierten Reflektoren eine entscheidende Rolle. Und zwar nicht nur energetisch mit dem Ziel einer gleichmäßigen Pegelverteilung im Raum, sondern auch der Vermeidung schädlicher Interferenzen der Schallwellen, insbesondere bei tieferen Frequenzen. In großen Räumen fallen Zuschauerflächen, auch Gestühl mit auf diese sorgfältig abgestimmter Schallabsorption, für nützliche Reflexionen weitgehend aus. Entsprechend nachrangig bestimmen sie die Raum-Akustik. Es ist daher auch nicht sinnvoll, sich bei der Definition objektiver Gütekriterien etwa nur auf Frequenzen zwischen 500 und 1.000 Hz zu konzentrieren, bei denen der Einfluss eigentlich irrelevanter Absorptionsflächen dominiert.

In den ersten 50 Jahren nach W. C. Sabines grandioser Definition der Nachhallzeit setzte sich unter Experten mit plausiblen Gründen die Überzeugung

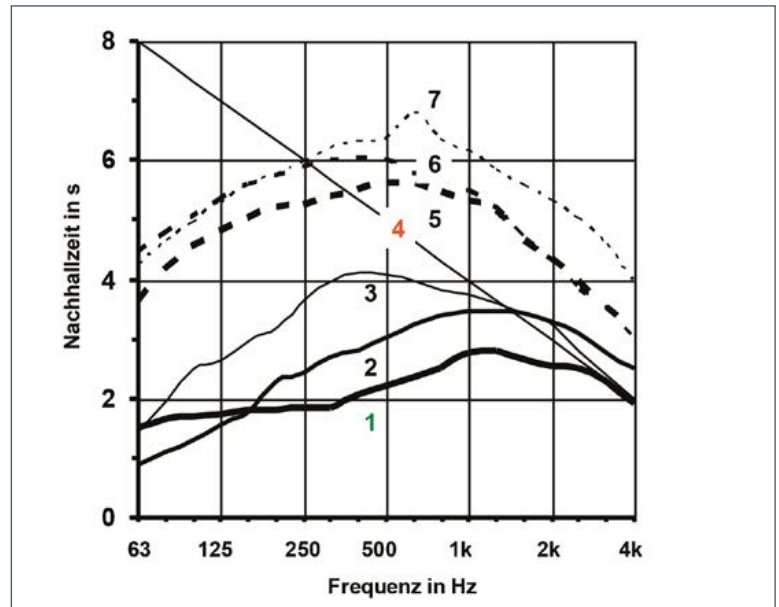
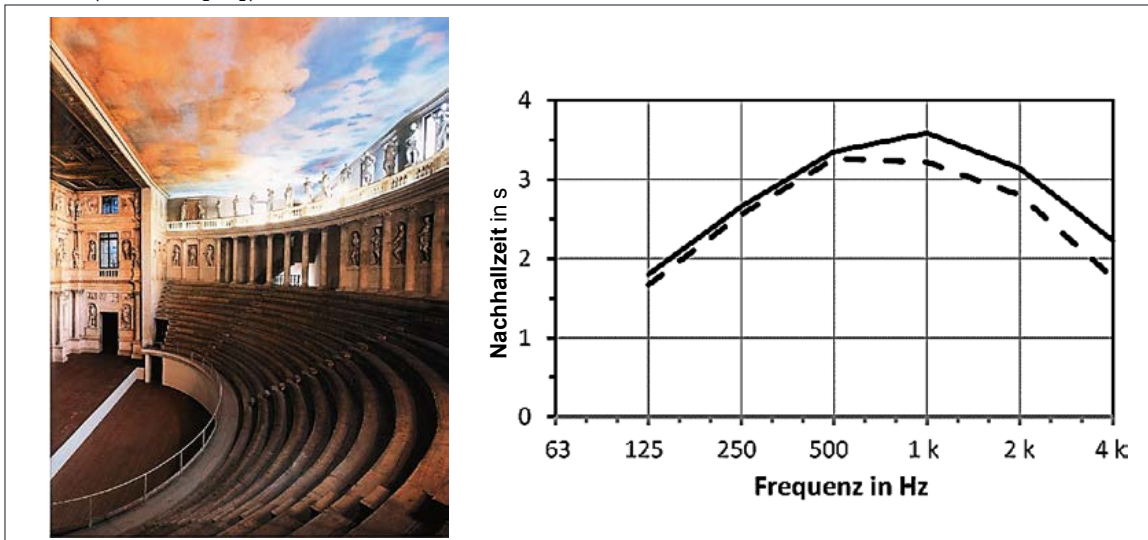


Abb. 12: Nachhallzeiten, wie sie in Barockkirchen typischer Weise gemessen werden [17]: (1) Jesus-Christus-Kirche Berlin, $V = 7.900 \text{ m}^3$; (2) „Bachkirche“ Arnstadt, $V = 6.900 \text{ m}^3$; (3) Thomaskirche Leipzig, $V = 18.000 \text{ m}^3$; (4) Kreuzkirche Dresden, $V = 30.000 \text{ m}^3$; (5) Frauenkirche Dresden, $V = 25.300 \text{ m}^3$; (6) Abteikirche Rot, $V = 30.000 \text{ m}^3$; (7) Michaeliskirche Hamburg, $V = 32.000 \text{ m}^3$

durch, dass diese zu den tiefen Frequenzen möglichst nicht ansteigen sollte, siehe [8, Abschn. 11.6]. Erst später meinte eine Mehrheit der Akustiker, dass ein $BR > 1$ sich vorteilhaft auf die Wahrnehmung von Musik auswirken könne. So entstanden hunderte Säle, die mehrheitlich eine zu den Tiefen ansteigende Nachhall-Charakteristik aufweisen. Man gab sich zwar über ein hinreichend großes Raumvolumen im Verhältnis zur Zuhörerzahl Mühe, dass die Mitten nicht zu kurz nachhallen, aber den Bassbereich überließ man oft dem Zufall oder trieb sogar Aufwand,

Abb. 13: Nachhallzeit auf der Bühne (strichliert) und im Auditorium (durchgezogen) im Teatro Olimpico in Vicenza (Foto: aus [41])



um „Tiefen-Schlucker“ zu vermeiden:

Bei M. Barron [42, Abschn. 2.8 und 3.4] liest man z. B.: *„An increase in reverberation time ($BR > 1$) is very advantageous for orchestra concerts for energetic reasons, since most low instruments have their strongest sound contributions above 200 Hz and radiate only relatively weakly at lower frequencies. It is therefore advantageous when the fundamental registers of bass voices are strengthened by the hall ... The preferred degree of bass rise is a matter of taste ... A value at 125 Hz up to 50 % above that at mid-frequencies is normally recommended ... The implication for a concert hall, in which a long bass reverberation time is sought, is that all walls, ceilings and suspended elements need to be sufficiently massive to minimize low-frequency absorption. This approach obviously has cost implications“*. Gern gab man deshalb schweren Massivbauteilen gegenüber leichten schwingfähigen Verschaltungen den Vorzug, etwa so wie es Y. Toyota bei der Elbphilharmonie mit der „Weißen Haut“ nach eigenen Worten im Sinn hatte und für den Pierre-Boulez-Saal ja tatsächlich auch erreicht hat.

Das Streben nach einem $BR > 1$ hat schon zu ganz eigenartigen Baumaßnahmen in Konzertsälen geführt, siehe [8, Abschn. 11.2.1]. Auch elektroakustische Hilfsmittel kamen dazu zum Einsatz. H. Kuttruff beschreibt in [43, Abschn. X.5] z. B. ein „assisted resonance system“, mit dem sich mittels 172 Lautsprechern in der Decke der Royal Festival Hall in London [24, S. 245] der Nachhall z. B. bei 63 Hz von 1,3 auf 2,2 s weit über den Wert von 1,4 s bei mittleren Frequenzen anheben ließ.

Das entgegengesetzte Konzept konnte zwar hier und da [33] überzeugend umgesetzt werden. Aber an der Mehrheitsmeinung hat sich dadurch noch nicht viel geändert. Diese kann sich leider durch eine jüngst erschienene Raumakustik-Norm [13] (siehe Abb. 1) sogar noch bestärkt fühlen. Deshalb wurden hier ganz bewusst einmal prominente Beispiele herausragender Akustik diskutiert, in denen namhafte Akustiker eigentlich etwas Besseres erreicht als geplant haben. Betrachtet man nämlich allseits hoch geschätzte historische Auditorien wie z. B. Musikvereinssaal, Concertgebouw, Boston Symphony genauer, so stellt man ebenfalls fest, dass deren Nachhall-Charakteristik entgegen der Norm eher auf ein $BR < 1$ als auf $BR > 1$ hinweist. Vermutlich würde man auch unter anderen als gut eingestuft Sälen sehr viele mit einem $BR < 1$ herausfinden, wenn man die für die raumakustische Qualität relativ unwesentliche Absorption der Zuschauer etwas außer Acht ließe.

Jedenfalls sollte man grundsätzlich dafür sorgen, dass

- der Direktschall breitbandig möglichst stark beim Hörer ankommt,
- für mittlere Frequenzen die frühen Reflexionen

so gut wie irgend möglich auf die beteiligten Akteure und Zuhörerbereiche ausgerichtet werden,

- für tiefe Frequenzen alle Begrenzungsflächen im Raum möglichst stark absorbierend ausgeführt werden.

Die entsprechenden Werkzeuge, Materialien und Bauteile für die optimale Schalllenkung und -dämpfung sind inzwischen längst in großer Auswahl praxis- und marktgerecht verfügbar [8]. Mit diesen drei Grundregeln wird das Arsenal verantwortungsvoller Planer natürlich noch längst nicht ausgeschöpft. Aber bei ihrer Missachtung wird der Rest umso schwieriger!

Auch wenn dies zur Ausnahme in der Baupraxis geworden ist: Bereits vor einer Entscheidung für oder gegen einen Entwurf zu einem größeren Saal für die Darbietung von Musik oder Sprache tut der Bauherr gut daran, einen Akustiker seines Vertrauens zu konsultieren. Das geschah so im bescheidenen Mainzer Projekt [33], aber auch beim Wettbewerb zur spektakulären Berliner Philharmonie. Der verantwortliche Akustiker in Berlin betont in [44], so könne auf voraussagbare akustische Probleme frühzeitig Einfluss genommen werden; es schließe aber ein Fortschreiten von Erprobtem und Bewährtem zu Neuland und Wagnis nicht aus. Bei allen drei von L. Cremer 1956 diskutierten Entwürfen spielte bereits die von ihm so getaufte „Tiefenschluckung“ eine wichtige Rolle. So sollte im schließlich preisgekrönten und ausgeführten die unterste Schale der Decke *„mitschwingfähig und somit tiefenschluckend ausgeführt sein. Außerdem bieten die vielen Wand- und Stufenflächen, die mit Holzvertäfelung bedeckt sein sollen, hierzu Gelegenheit“* [44, S. 62]. Dass ein $BR \gg 1$, wie ihn die DIN 18041 gemäß Abbildung 1 toleriert, in kleineren Räumlichkeiten sich auf die Sprachverständlichkeit negativ auswirkt und auch eine erhöhte Schallbelastungen bewirken kann, wird in Teil 2 (siehe Akustik Journal 03/2018) dargestellt.

Literatur

- [1] Kuusinen, A.; Lokki, T.: Wheel of concert hall acoustics. Act. Acoust. Ac. 103, S. 185–188, 2017
- [2] Blesser, B.; Salter, L.-R.: Spaces speak, are you listening? Experiencing aural architecture. MIT Press, Cambridge, 2017.
- [3] Schrickler, R.: Kreative Raum-Akustik für Architekten und Designer. DVA, Stuttgart, 2001.
- [4] Sabine, W. C.: Reverberation. The American architect, 1900.
- [5] Beranek, L. L.: Concert and opera halls – how they sound. Acoust. Soc. Am., New York, 1996.
- [6] Nagata, M.: Concert halls. <http://www.nagata>.

- [co.jp/e_company/index.html](http://www.nagata.co.jp/e_company/index.html)
- [7] Cremer, L.; Müller, H.A.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Bd. I., Hirzel, Stuttgart, 1978.
- [8] Fuchs, H.V.: Raum-Akustik und Lärm-Minderung. Springer, Berlin, 2017.
- [9] DIN EN ISO 3382–2000: Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Bezug auf andere akustische Parameter.
- [10] Bradley, J.S.: Review of objective room acoustics measures and future needs. Proc. Intern. Symp. Room Acoust. ISRA, Melbourne, 2010.
- [11] ISO 3382-1 (2009): Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
- [12] Witew, I.B.: Zur subjektiven Bewertung der Akustik in Konzertsälen: Gibt es die perfekte Akustik? VDT-Magazin 1. S. 19–23, 2006.
- [13] DIN 18041–2016: Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung.
- [14] Beranek, L.L.: Music, acoustics, and architecture. Wiley & Sons, New York, 1962.
- [15] Kuttruff, H.: Raumakustik. In: Heckl, M., Müller, H.A. (Hrsg.) Taschenbuch der Technischen Akustik, Kap. 23. Springer, Berlin, 1994.
- [16] Vorländer, M.: Auralization. Springer, Berlin, 2008.
- [17] Meyer, J.: Kirchenakustik. Bochinsky, Frankfurt, 2003.
- [18] Fasold, W.; Veres, E.: Schallschutz + Raumakustik in der Praxis. Verlag Bauwesen, Berlin, 2003.
- [19] Fuchs, H.V.; Steinke, G.: Requirements for low frequency reverberation in spaces for music. Part 2: Auditoria for performances and recordings. Psychomusicology: Music, Mind and Brain 25, H. 3, S. 282–293, 2015.
- [20] Ahnert, W.; Steffen, F.: Beschallungstechnik. Hirzel, Stuttgart, 1993.
- [21] Meyer, J.: Die Schallabstrahlung der Streichergruppen im Orchester. In: 25. Tonmeistertagung, Leipzig 2008.
- [22] Adelman-Larsen, N.W.: Rock and pop venues. Acoustic and architectural design. Springer, Berlin, 2014.
- [23] Bradley, J.S.; Souloudre, G.A.; Norcross, S.: Factors influencing the perception of bass. J. Acoust. Soc. Amer. 101, S. 3.135, 1997.
- [24] Beranek, L.L.: Concert halls and opera houses – music, acoustics, and architecture. Springer, New York, 2004.
- [25] Burkowitz, P.K.: The world of sound – Music on its way from the performer to the listener. Schiele&Schön, Berlin, 2011.
- [26] Toyota, Y.; Oguchi, K.: Elbphilharmonie opens in Hamburg. Highlights of room acoustics and sound isolation design. Nagata News 350 (017–02), 2017.
- [27] Burkowitz, P.K.: Psychoakustische Verformungen der Wahrnehmung von aufgenommenem Schall. VDT-Magazin 1.2006, S. 10–18.
- [28] Fuchs, H.V.: Raum-Akustik mal ganz anders – Exkursion 1. In: Deutsche Jahrestagung für Akustik – DAGA 2010, Berlin, Programm, S. 24–26.
- [29] Leiberger, T.: Jesus-Christus-Kirche Berlin-Dahlem. Ev. Kirchengemeinde Dahlem, 1991.
- [30] Horn, C.: Die kirchliche Bautätigkeit der letzten Jahre. Kunst und Kirche 9, H.1/2, S. 3–12, 1932.
- [31] Cremer, L.: Die raum- und bauakustischen Maßnahmen beim Wiederaufbau der Berliner Philharmonie. Die Schalltechnik 24, H. 1, S. 1–11, 1964.
- [32] Fasold, W.; Sonntag, W.; Winkler, H.: Bau und Raumakustik. Verlag Bauwesen, Berlin, 1987.
- [33] Fuchs, H.V.; Zha, X.; Drotleff, H.: Eine neue Akustik für vier Sparten – Das Große Haus des Staatstheaters Mainz. Bauphysik 25, H. 3, S. 111–121, 2003.
- [34] Fuchs, H.V.: Zum Bassverhältnis in akustisch herausragenden Konzertsälen. Bauphysik 40, H. 2, S. 74–85, 2018.
- [35] Kunz, A.: Wirklich Weltklasse? Fono Forum 3.2017, S. 16–17.
- [36] Fasold, W.; Veres, E.: (2003) Schallschutz + Raumakustik in der Praxis. Verlag Bauwesen, Berlin, 2003.
- [37] http://www.nagata.co.jp/e_sakuhin/factsheets/Elbphilharmonie.pdf
- [38] Fuchs, H.V.: 458 Tonnen für den guten Ton. Trockenbau Akustik 35, H. 2, S. 72–75, 2018.
- [39] http://www.nagata.co.jp/e_sakuhin/factsheets/BoulezSaal.pdf
- [40] http://www.nagata.co.jp/e_sakuhin/factsheets/Jinji Lake Concert Hall.pdf
- [41] Pappalardo, U.; Borelli, D.: Antike Theater. Petersberg: Imhof, 2007.
- [42] Barron, M.: Auditorium acoustics and architectural design. E&FN Spon, London, 1993.
- [43] Kuttruff, H.: Room acoustics. Elsevier Appl. Sciences, 1991.
- [44] Cremer, L.: Drei Entwürfe zur Berliner Philharmonie/Three projects for the Berlin Philharmonie. Gravesaner Blätter 3, H. 9, S. 55–66, 1957. ■

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