Gute Raumakustik – nur ein Zufall?

Eine Dokumentation über die *Jesus-Christus-Kirche* in Berlin-Dahlem

Helmut V. Fuchs und Peter K. Burkowitz

Durch eine, im Gegensatz zur geltenden Lehrmeinung und Normung, zu den tiefen Frequenzen hin fallende oder zumindest gleich bleibende Nachhall-Charakteristik lassen sich besonders Mehrzweckräume für Sprache wie für Musik akustisch optimal konditionieren. Sie werden dadurch auch hinsichtlich der für das individuelle Klangbild genauso wichtigen mittleren und hohen Frequenzen sehr flexibel nutzbar. Alle darin dargebotenen Schallereignisse werden so gut durchhörbar und verständlich – unabhängig von der Absorption durch die jeweilige Besetzung des Raumes.

Zur Wahrnehmung von Akustik

Die *Hörsamkeit* eines Raumes nimmt der Mensch, im positiven wie im negativen Sinne, auf drei sehr verschiedenen Ebenen wahr:

(1) *ästhetisch* als die jeweilige Architektur *darstellend*: Beim Betreten einer großen gotischen Kathedrale erwartet er z. B. einen gewaltigen Nachhall als *Ausdruck* erhabener, göttlicher Kraft. Der Raum kann – nicht nur bei der Darbietung *Gregorianischer Gesänge* – für den hingebungsvoll Lauschenden wohltuend mitschwingen. Aber auch ein rundum von Glas umschlossenes Foyer mit teurem Marmorboden kann auf den Besucher eines florierenden Unternehmens den gewünschten edlen *Eindruck* besonders dann entfalten, wenn eine auffällige „Akustik" diesen noch unterstützt.

(2) *ergonomisch* als die Kommunikation in Arbeits- oder Freizeitbereichen *fördernd* oder *behindernd*: Der längere Aufenthalt z. B. in Orchestergräben und -probesälen, Konferenz- und Unterrichtsräumen oder Großraumbüros und Restaurants kann zu einer (ebenfalls körperlich spürbaren) Tortur werden, wenn der Raum für die jeweilige Nutzung zwar ein optisch ansprechendes Ambiente bietet, aber akustisch dafür schlecht konditioniert wurde.

(3) *funktional* in Bezug darauf, wie gut die Schallwellen einzelner Stimmen oder größerer Ensembles untereinander oder zu einem Auditorium *übertragen* werden: In Vortrags-, Theater-, Oper- oder Konzertumgebungen müssen neben Schall dämmenden und dämpfenden Maßnahmen noch eine ganze Reihe anderer Vorkehrungen getroffen werden, die einen Raumakustiker traditionell am stärksten herausfordern, wie z. B. die wirksame Unterdrückung der lästigen „stehenden Wellen" und des „mulmigen Dröhnens" im Tiefton-Bereich.

Hier soll einmal die „gefühlte" Raum-Akustik (1) ganz bewusst außer Acht gelassen werden, weil diese allzu oft die anderen Kriterien für Raum-Qualität verdeckt. In der „Pflicht"- (2) wie in der „Kür"-Disziplin (3) der Raum-Akustik spielt der *Nachhall* des Raumes eine ganz zentrale Rolle. An anderer Stelle [1, 2] wurde schon im Detail ausgeführt, wie wichtig eine gezielt frequenzabhängige Bedämpfung des Raumes für den Schallschutz und die akustische Behaglichkeit seiner Nutzer ist. In diesem Aufsatz werden aber weder die *ästhetischen* (1) noch die *ergonomischen* (2) Auswirkungen der Raum-Akustik weiter diskutiert. Stattdessen soll an einem prominenten Beispiel aufgezeigt werden, welche Frequenz-Charakteristik der Nachhallzeit von geschulten Nutzern eines Raumes *funktional* (3) (zum Darbieten, Aufnehmen und Hören von Musik und Sprache) als besonders förderlich beurteilt wird. Ein Widerspruch ergibt sich dadurch allenfalls zu Kriterium (1), niemals aber zu (2).

Orchestermusiker müssen berufsbedingt unter unterschiedlichsten räumlichen Bedingungen arbeiten. Sie wissen deshalb erfahrungsgemäß viel besser als ihre Zuhörer und, dank ihrer im Ensemblespiel besonders geschulten Ohren, auch kompetenter als einzelne Redner, Sänger und Solisten bereits bei der ersten Anspielprobe, ob und wie die jeweilige Umgebung ihre Arbeit unterstützt oder erschwert.

Auch Tonmeister und -ingenieure merken sehr rasch, ob ein Raum eine Aufnahme oder Übertragung fördert oder behindert [3]. Weil aber alle professionellen Akteure sich verständlicherweise nur in Extremfällen über die funktionale Akustik einer Spielstätte äußern, bilden mehr oder weniger kompetente Äußerungen honoriger Gäste und ambitionierter Kritiker unmittelbar nach seiner Eröffnung die oft erstaunlich nachhaltige Einschätzung der „Akustik" eines Auditoriums.

Bei jeder subjektiven Beurteilung spielen natürlich der optisch dominierte Gesamteindruck des Bauwerks sowie der sehr zweifelhafte und unzuverlässige Vergleich mit irgendwie im Gedächtnis haftenden Vorbildern eine entscheidende Rolle. Offenbar existiert auch noch kein allgemein anerkanntes objektives Kriterium für gute Raumakustik (siehe hierzu z. B. [4]). Stattdessen meinen nicht Wenige, dass gute Raumakustik mehr oder weniger Glücksache, voller Magie und Geheimnisse sei, mindestens aber kaum verlässlich berechenbar.

Prof. Dr.-Ing. Helmut V. Fuchs, Terrassenstraße 21c, 14129 Berlin und Tonmeister Peter K. Burkowitz, Im Kamp 26, 30657 Hannover.

Muss ein vages negatives Urteil einmal nachträglich ins Positive gewendet werden, wird manchmal gemutmaßt, dass sich die Akteure auf der Bühne oder gar die Baumaterialien im Saal aufeinander „eingespielt" hätten. Wenn andererseits grobe raumakustische Mängel von dauerhaft aktiven oder passiven Nutzern der Räumlichkeit mit Nachdruck beanstandet werden, beschränken sich Besserungsversuche meistens auf Schall lenkende Maßnahmen zwischen den Sendern und Empfängern der Schallereignisse. Bei Bau- und Sanierungsvorhaben wird dagegen noch viel zu wenig auf die *richtige* Bedämpfung des Raumes geachtet, die sehr konkret und eindeutig erst die Voraussetzung für einen wirklich hörbaren Erfolg, ein funktional rundum befriedigendes Ergebnis, schafft.

Der Frequenzgang der Nachhallzeit entscheidet

Mit der üblichen Festlegung und Einhaltung einer bestimmten, der Raumgröße grob angepassten Nachhallzeit T_{soll} bei mittleren Frequenzen (etwa zwischen 500 und 2000 Hz nach [5] bzw. 500 und 1000 Hz nach DIN 18041 und [6]) ist nämlich noch nicht viel gewonnen. Bevor man sich aber vielen anderen raumakustischen Parametern, zumeist in demselben Frequenzbereich, zuwendet, sollte man sich intensiver als allgemein üblich um die Nachhallzeit bei den tieferen Frequenzen kümmern: Was hier an für jegliche Nutzungsart notwendiger Absorption im Innenausbau versäumt wurde, lässt sich später nicht leicht nachrüsten und auch durch keine andere raumakustische Maßnahme wieder gutmachen. Wenn man die mit Abstand schädlichste, allzu oft unkontrollierte tieffrequente Raumantwort aber einmal gebändigt hat, kann die Nachhallzeit bei den so wichtigen mittleren und hohen Frequenzen, je nach Nutzungsart und Geschmack, in weiten Grenzen sinnvoll gestaltet werden.

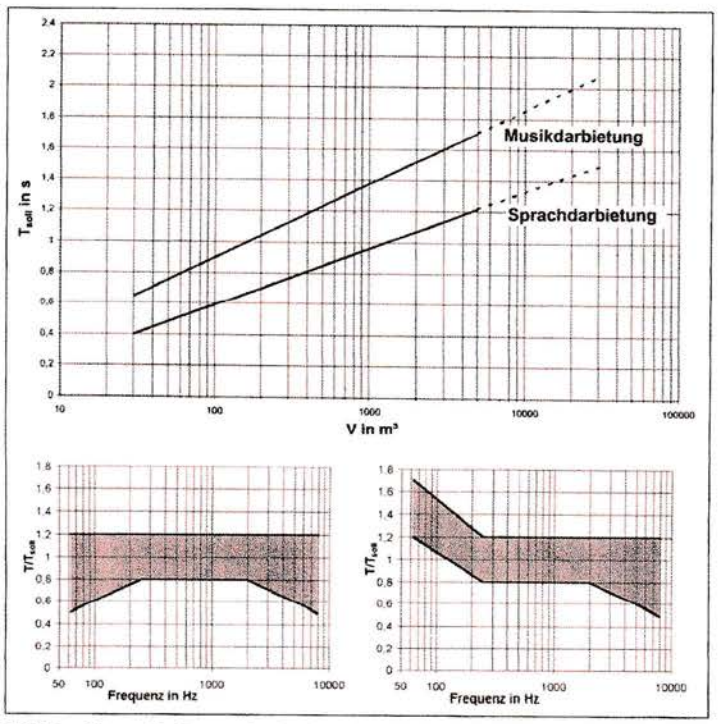

Bild 1. Oben: Sollwert der bei 500 und 1000 Hz gemittelten Nachhallzeit für Sprache und Musik in Abhängigkeit vom Raumvolumen. Unten: Frequenzabhängiger Toleranzbereich der Nachhallzeit bezogen auf T_{soll} für Sprache (links) bzw. Musik (rechts) nach DIN 18041 [6].

In der DIN 18041 wird zwar das Toleranzband für die Frequenzcharakteristik der Nachhallzeit für Sprache und Musik bis 63 Hz herunter spezifiziert, siehe *Bild 1 (unten)*. Tatsächlich meinen aber manche Akustiker, die Nachhallzeit unter 125 Hz kaum messen zu können oder gar beurteilen zu müssen. Dabei konnte in mittlerweile zahllosen Neubau- und Sanierungsvorhaben die große Bedeutung der Oktave zwischen 63 und 125 Hz in Kommunikationsräumen für Sprache und Musik demonstriert werden. Ausgehend von den raumakustischen Anforderungen in Tonstudios wurden frühzeitig Raum sparende und breitbandig wirksame Tiefen-Schlucker entwickelt und praktikable Konzepte gegen das sehr unangenehme Dröhnen der Räume bei ihren Eigenfrequenzen (bei Abmessungen von 10 m z. B. oberhalb etwa 32 Hz) propagiert [7]. Inzwischen konnte auch bereits nachgewiesen werden, dass eine nachhaltige Bedämpfung des Frequenzbereiches unter 125 Hz (besser noch: unter 250 Hz) nicht nur die Aufnahme- und Bearbeitungsbedingungen für Tonmeister und -ingenieure verbessert: Wenn man dem Raum hier die Möglichkeit nimmt, mit den in ihm erzeugten Schallwellen zu interferieren, kann man darüber hinaus auch

- die akustische Klarheit und Transparenz des Dargebotenen wohltuend erhöhen,
- das gegenseitige Hören und Verstehen erheblich erleichtern,
- den unbewussten Zwang zum lauter als eigentlich erwünscht und notwendig Sprechen oder Musizieren abbauen.

Wenn man nämlich durch geeignete raumakustische Maßnahmen verhindert, dass die Nachhallzeit, wie es die Norm geradezu nahe legt, zwischen 125 und 63 Hz gern bis auf das Doppelte ihres Sollwertes bei den mittleren Frequenzen ansteigen kann, erreicht man eine Minderung der Expositionspegel von Musikern in ihren Orchestergräben, Proben-, Unterrichts- und Übräumen um ca. 10 dB (A) [1]. In Büro-, Dienstleistungs- und Call-Centern, für die DIN 18041 eigentlich gar keine Sollwerte der Nachhallzeit meint vorschreiben zu sollen, können geistig hart arbeitende Menschen auf diese Weise sogar um mehr als 20 dB (A) entlastet werden [2].

Der neue Ansatz

Nach *Bild 1 unten rechts* könnte man innerhalb der Toleranzfläche eine von den höchsten zu den tiefsten Frequenzen monoton ansteigende Nachhallzeit, wie sie in so vielen historischen und modernen Darbietungs- und Versammlungsräumen anzutreffen ist, für Musik geradezu als erstrebenswert, mindestens aber für normgerecht halten. In [3, 8] wird dagegen – im krassen Widerspruch zu den verbreiteten Lehrmeinungen, Baunormen und Richtlinien – für die Darbietung und Aufnahme von Musik und Sprache auch aus klangästhetischen Gründen eine Absenkung der Nachhallzeit von den mittleren zu den tiefen Frequenzen hin propagiert. Denn tiefe Frequenzan-

teile werden von allen Klangerzeugern ziemlich ungerichtet abgestrahlt. Ihre Schallwellen sollten eigentlich die Ohren der Hörer bzw. die Mikrofone mit ebenso unverfälschter Kontur erreichen, wie es für die stärker gerichtet abgestrahlten Melodietonlagen und Formanten angestrebt wird. Tatsächlich interferieren aber – selbst bei gleichmäßiger Absorption aller reflektierenden Flächen – die tieferen Anteile auf destruktive Art und Weise viel stärker als die hohen mit den nächsten Rückwürfen benachbarter Wände. Wenn der weitere Raum aber die Tiefen auch noch stärker als die Höhen nachhallen lässt, entsteht so eine eigenartige, die Tiefen unnatürlich betonende „Raumfüllung" – ein Phänomen, das von raumakustischer Planung bislang noch zu wenig berücksichtigt wird. Durch die deshalb oft anzutreffende zu den Tiefen ansteigende Nachhallzeit bildet sich hier unvermeidbar ein konturlos wabernder Klangsumpf, aber kein festes Bass-Fundament mit einem markanten Direktschallanteil, auf welchem die Höhen ihr komplexes Klangbild aufbauen könnten.

Für die Wahrnehmung beim Zuhörer mag die starke raumbedingte Vermischung und Verfärbung der Basslinien gewohnheitsmäßig als „Räumlichkeit", „Wärme" und „Umhülltsein" sogar positiv aufgenommen werden. Für Aufnahmen, in denen der hörbare Raumanteil im Gesamtklangbild eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielt, sollte man dagegen die Nachhall-Charakteristik nach Möglichkeit so formen, dass der reflektierte Schall bei einem mittleren Mikrofon-Abstand zu den Quellen wenigstens etwa frequenzneutral ankommt. Nur so kann man, z. B. bei einer stereophonen Aufnahme, auch zu einer deutlichen Lokalisierung aller Quellen in einem größeren Ensemble von einer angemessen weit entfernten Mikrofonposition aus kommen, die bei der späteren Wiedergabe die gewünschte Fokussierung der Quellorte in der Podiumsfläche auch bei tieferen Tonlagen erleichtert.

Manche Solisten meinen zwar, vom sonoren Nachhall des Raumes für ihre Stimme irgendwie profitieren zu können. Aber alle Kompositionen mit vielschichtiger Stimmführung und großer instrumentaler Besetzung werden eindeutig besser durchhörbar und von den Musikern deshalb leichter zum Klingen gebracht, wenn man dem Raum keinen großen Einfluss auf die Halt gebenden Basslinien gestattet. So kann auch der im Melodieton-Bereich wichtige Nachhall bei höheren Frequenzen für das gesamte Klangerlebnis viel besser zur Geltung kommen.

Nach diesem Konzept konditionierte Säle können durch eine exzellente Akustik für die Darbietung, Aufnahme und Wiedergabe von Sprache und Musik überzeugen – gleichgültig wie groß die jeweilige Besetzung mit (entsprechend absorbierenden) Akteuren und Zuhörern gerade ist. Diese aus jüngeren Neubau- und Sanierungsaufgaben gewonnene Erkenntnis soll an einem etwas älteren, aber bereits in der Fachwelt wegen seiner herausragend guten Akustik uneingeschränkt gerühmten und deshalb sehr intensiv genutzten Raum praktisch erläutert werden. Dabei ist bemerkenswert, dass bei der Planung und der Errichtung der *Jesus-Christus-Kirche* [9] zwischen 1929 und 1931 eigentlich niemand – am wenigsten der frühzeitig mit der Akustik beauftragte *J. Biehle* – die Realisierung einer besonders guten Akustik in der ursprünglich ca. V = 8400 m³ großen Halle erwartet hatte. Noch heute erscheint selbst den zahlreichen zufriedenen Musikern, Zuhörern und Tonmeistern, die den Kirchenraum seit 60 Jahren ununterbrochen und vielfältig nutzen, dessen für alle Schallereignisse förderliche Akustik immer noch etwas rätselhaft.

Die Kirche als Mehrzweckraum

Nirgendwo variieren die raumakustischen Eigenschaften stärker als in den Kirchen verschiedener Epochen und Baustile (siehe das Standardwerk von *J. Meyer* [10]). Waren diese früher hauptsächlich den Gottesdiensten geweiht, so stellen sie heute oft regelrechte Mehrzweckräume dar. Hier sei dahin gestellt, ob es Sinn macht, Werke mit Solisten, großem Chor und Orchester in einem romanischen Dom aufzuführen, auch wenn sich Tausende Zuhörer auf der oben angesprochenen Wahrnehmungsebene (1) von den geradezu überwältigenden *Klangmassen* oft sehr beeindruckt zeigen. Vielmehr soll hier die Herausforderung angenommen werden, auch und gerade in Kirchenräumen auf der Wahrnehmungsebene (3)

- jedes gesprochene Wort auch *ohne* elektro-akustische Unterstützung überall im Raum verstehen zu können,
- beim Musizieren in kleinen oder größeren Ensembles die einzelnen Stimmen oder Gruppen für jeden Spieler, Sänger und Dirigenten klar durchhörbar zu machen,
- sowohl das Spiel der Orgel als auch eines großen Orchesters mit Chor und Solisten in allen Feinheiten der Partitur zu allen Akteuren und Zuhörern zu übertragen.

Es versteht sich von selbst, dass in einem solchen vielfältig nutzbaren Raum auch ein Aufnahmeteam kein Problem hat, das Dargebotene aufzuzeichnen, zu speichern und zu senden, ohne – wie bei untauglicher Akustik – gezwungen zu sein, mit einer Vielzahl von Mikrofonen fast jede einzelne Stimme einzeln aufzunehmen und damit anschließend im Studio das Werk, in Abstimmung mit dem Dirigenten und Produzenten, klanglich neu zusammenzusetzen.

Genauso selbstverständlich ist es aber auch, dass man mit Rücksicht auf den Denkmalschutz und die primäre Bestimmung des Gebäudes keine den visuellen Raumeindruck stark verändernden akustischen Maßnahmen ergreifen darf. Im Rahmen einer umfassenden Restaurierung lassen sich aber heute, völlig unauffällig, fehlende Dämpfungsmaßnahmen auch nachträglich integrieren [8].

Natürlich kann man auf der Ebene (1) gute Gründe für eine ganz andere Raum-Akustik anführen: z. B. den Denkmalschutz im akustischen wie im visuellen Sinne, auch klang-*ästhetische* Anforderungen mit religiösem, esoterischem oder nostalgischem Hintergrund. In diesem Beitrag wird aber, wie gesagt, einmal ausschließlich auf der *funktionalen* Wahrnehmungsebene (3) argumentiert.

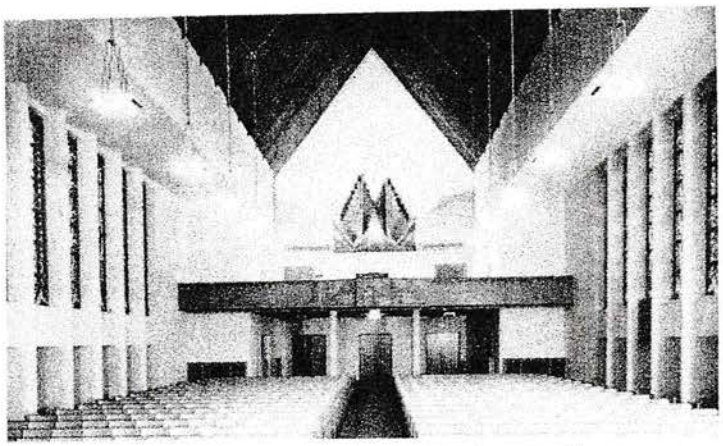

Bild 2. Innenansicht der *Jesus-Christus-Kirche* vom Altarraum aus, kurz vor ihrer Einweihung 1931 [11].

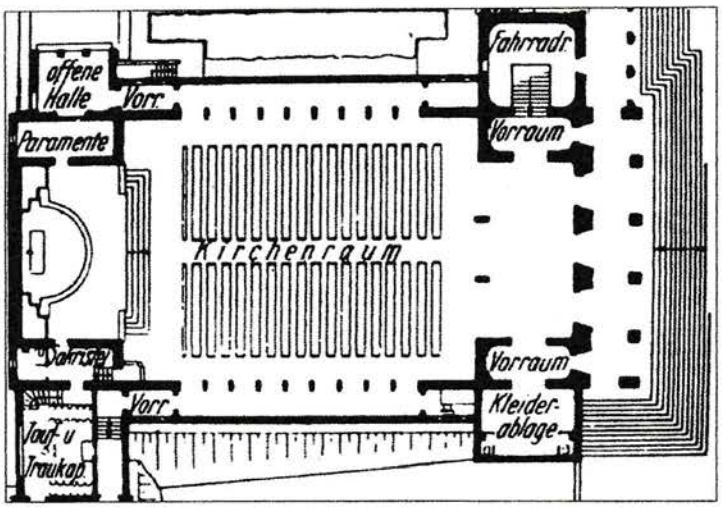

Bild 3. Grundriss der *Jesus-Christus-Kirche* [12].

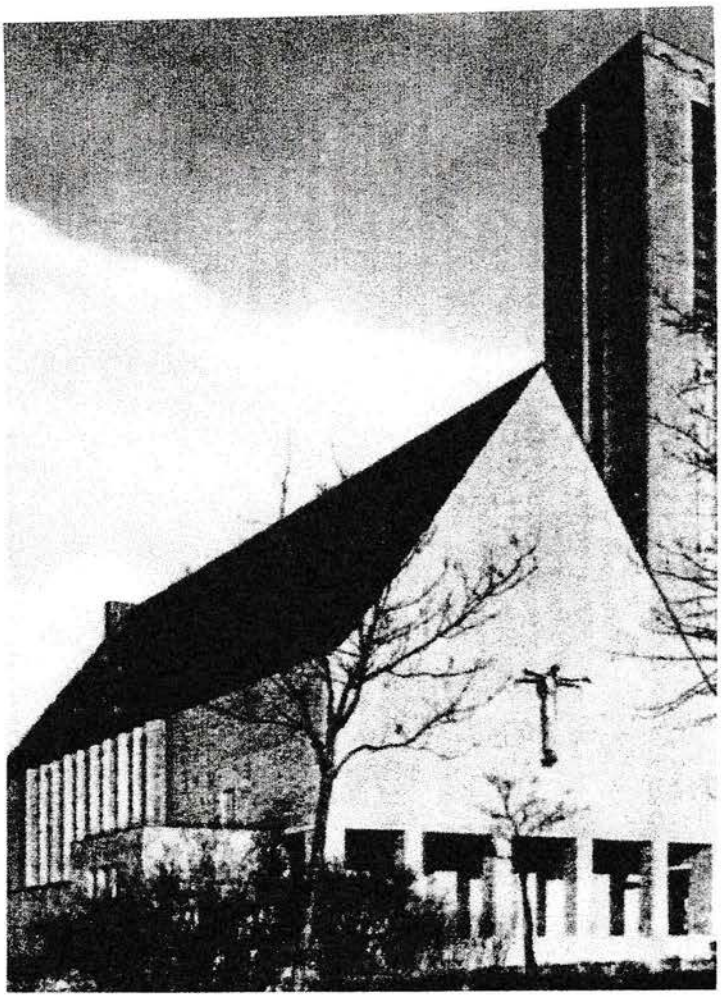

Bild 4. Außenansicht der *Jesus-Christus-Kirche*, kurz vor ihrer Einweihung 1931 [12].

Ein Neubau mit akustischen Risiken

Die damals stark wachsende evangelische Kirchengemeinde in Berlin-Dahlem benötigte um 1930 neben ihrer kleinen, fast 800 Jahre alten Dorfkirche *St. Annen* ein zweites Gotteshaus mit dem dreifachen Fassungsvermögen (für maximal 1200 Besucher). Es wurde entworfen und ausgeführt vom Architekten *J. Bachmann*, der dabei einem Konzept des Kirchmeisters der Gemeinde und Professors an der Hochschule der Künste Berlin, *L. Bartning*, folgte. Die Gesamthaltung des Baues sollte demnach *außen wie innen von strengster Einfachheit sein und sich von jeder spielerischen Anlehnung an die dörfliche Vergangenheit ebenso fern halten wie von der Prachtentfaltung ihrer reichen Villenumgebung*" [9]. So entstand ein einziger großer Kirchenraum: einfach, klar und gradlinig, wie ihn *Bild 2* von innen und *Bild 3* als Grundriss zeigen.

Während von außen betrachtet *(Bild 4)* der riesige Giebel mit einem für die damalige Zeit sehr hohen (22 m im Scheitel) schlichten Steildach den Gesamteindruck bestimmt, zieht innen der erhöhte Altarraum *(Bild 5)* mit seinem 10 m hoch aufragenden Holzkreuz vor der portalartig strukturierten Stirnwand den Blick in die Höhe. Dieser und die Seitenwände mit den 18, 5,3 x 1,3 m großen, bis zur Höhe (12,5 m) der 3 m breiten Seitenschiffe reichenden Fenstern *(Bild 6)* sind (für die akustische Diffusität vorteilhaft) grob strukturiert. Die 5 Stufen und der

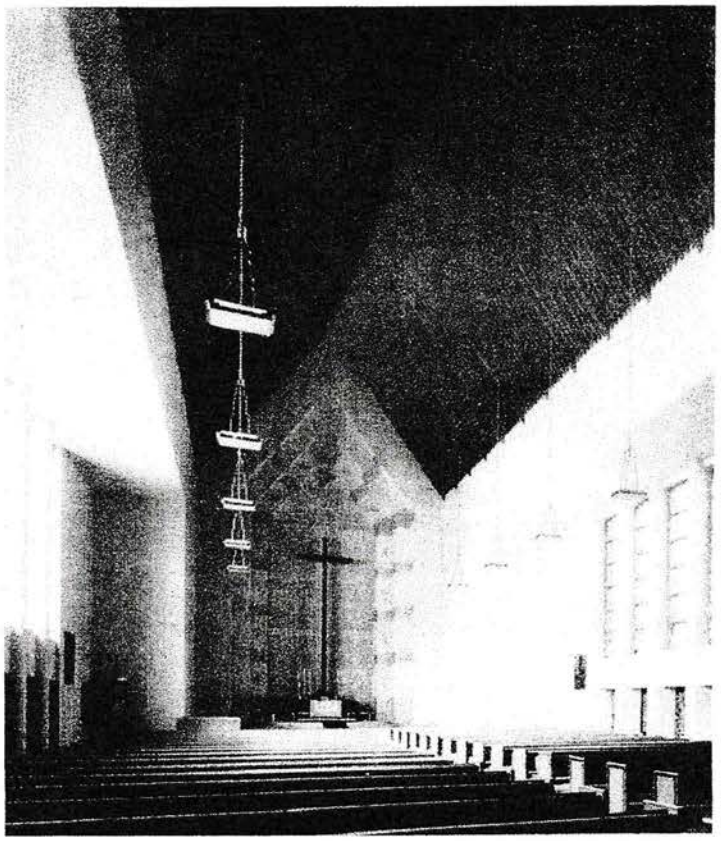

Bild 5. Ursprüngliche Innenansicht der Kirche zum Altarraum [11].

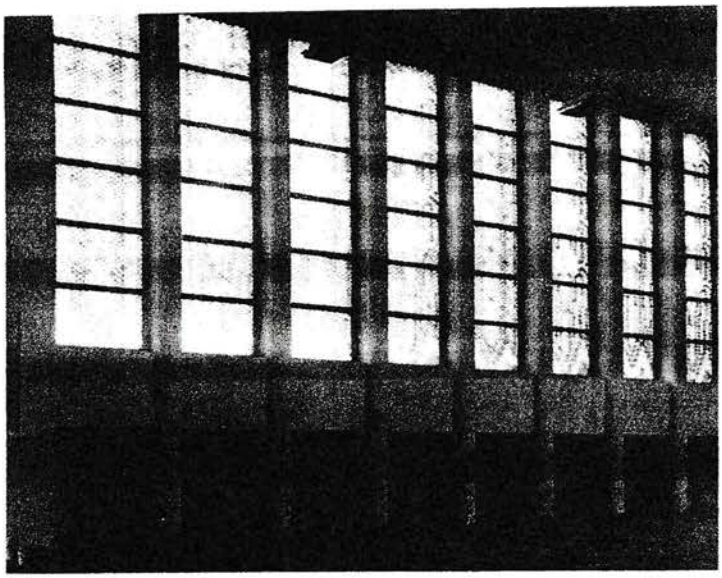

Bild 6. Ursprüngliche, in Beton gefasste Glasfenster in der Kirche [13].

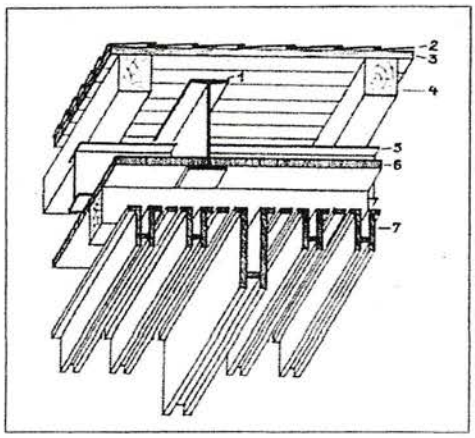

Bild 7. Das auf einer Stahl-Unterkonstruktion vollständig aus Holz aufgebaute Dach [12].
1: Binder,
2: Schieferdeckung,
3: Dachschalung,
4: Sparren,
5: Pfette,
6: Torfotektplatte,
7: Lamellendecke.

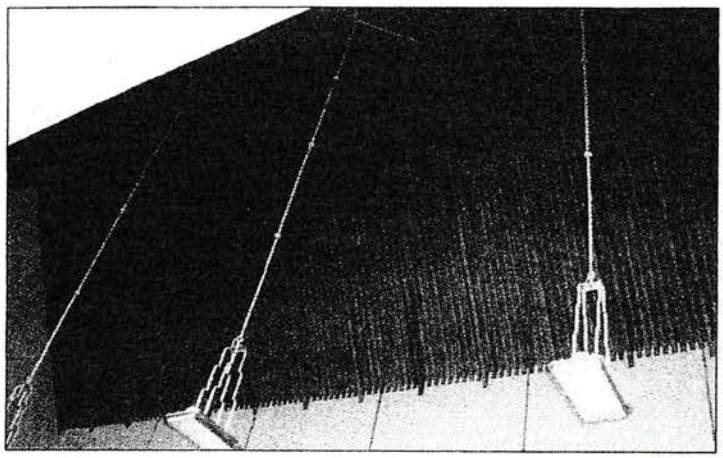

Bild 8. Unteransicht des für die Akustik der *Jesus-Christus-Kirche* entscheidenden Holzdaches (Foto: *A. M. Arnold*).

Boden im Altarraum bestehen aus Muschelkalkstein, das Holzparkett im Kirchenschiff liegt auf hartem Untergrund. Zusammen mit dem glatt verputzten Mauerwerk (S_M = 1280 m²) sind insgesamt ca. S_H = 2000 m² Begrenzungsfläche für hohe und mittlere Frequenzen als nur wenig Schall absorbierend anzusehen (Absorptionsgrad $\alpha_H \approx 0{,}05$ nach Tafel 12 in [5]). Sowohl das ursprüngliche Gestühl als auch die heute benutzten Bänke und Stühle tragen keinerlei absorbierende Polsterung.

Noch heute könnte ein derart strukturierter Mehrzweckraum für Sprache und Musik auch einen erfahrenen Akustiker in Verlegenheit bringen. Wenn er den Empfehlungen der DIN 18041 („Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen") aus dem Jahre 2004 folgen wollte, müsste er nach *Bild 1 oben* eine Nachhallzeit T, gemittelt von 500 bis 1000 Hz, zwischen 1,3 s (Sprachdarbietung) und 1,8 s (Musik) anstreben. Nach Tabelle 2 derselben Norm wünschte er sich wohl mehr als n = 1000 Besucher und entsprechend gepolstertes Gestühl, um mit einer Volumen-Kennzahl

$$K_n = \frac{V}{n} \tag{1}$$

von unter 8 m³ pro Person ohne umfangreiche absorbierende Maßnahmen eine für Musik- und Sprachdarbietung geeignete Akustik erreichen zu können. Selbst wenn man die vorhandenen Holzverschalungen der schrägen (S_D = 680 m²), waagrechten und senkrechten (S_K = 282 m²) Flächen sowie die Empore (S_E = 330 m²), Fenster (S_F = 124 m²), die Orgel (S_0 = 80 m²) und auch das Gestühl (S_S = 225 m²), etwa gemäß Tafeln 7 (Bsp. 1.1 bis 1.24) und 10 in [5] mit $\alpha \approx 0{,}1$, also mit einer äquivalenten Absorptionsfläche

$$A = \alpha S \tag{2}$$

von insgesamt 270 m² zum Ansatz brächte, müsste man eine Nachhallzeit T in s,

$$T = 0{,}16 \frac{V}{A} \tag{3}$$

von 5 s in diesem Frequenzbereich erwarten. Auch mit 500 bzw. 300 Besuchern, die nach Tafel 9 in [5] kaum mehr als 200 bzw. 120 m² Absorption zusätzlich hineintrügen, käme man allenfalls auf 3 bzw. 3,5 s, aber niemals in den nach der aktuellen Norm anzustrebenden Bereich unter 2 s.

Man kann daher gut verstehen, dass sich *C. Biehle* im Jahre 1930 *„immer mit äußerst großen Bedenken mit dem raumakustischen Zustand der Kirche"* befasst hat [9]: *„Die durchgeführte Berechnung hat ergeben, dass der Raum für rednerische und sogar auch für musikalische Zwecke zunächst völlig unbrauchbar sein wird. Der Kubikinhalt 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 Verhältnis steht.*

Dass *J. Biehle* sich mit seinen ernsthaften Bemühungen und ungewohnt selbstbewussten Forderungen stets – wie noch heute die meisten Akustiker – nur auf die höheren Frequenzen konzentriert hat, geht auch aus den folgenden Zitaten 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*

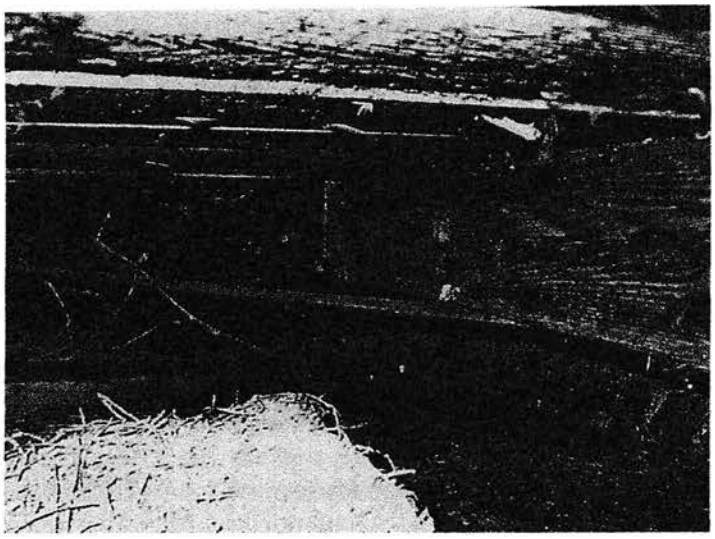

Bild 9. Blick vom Gang über einem der Seitenschiffe unter die Außenschalung des Daches nach *Bild 7* und *8*.

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 ... Ich sehe nicht ohne Besorgnis dem Endergebnis entgegen" [9].

Diesem Bestreben, den Nachhall, wie noch heute üblich, vor allem im für Sprache besonders kritischen Vokal-Bereich zwischen 500 und 1000 Hz zu dämpfen, sollten wohl die gemäß *Bild 7* ca. 15 bis 30 cm breiten Lamellen im Abstand von etwa 15 cm unter der inneren Dachhaut (s. *Bild 8*) dienen. Ob auch die ca. 2 cm breiten Schlitze in der Holzverschalung selbst aus schalltechnischen Gründen oder nur zu deren „Hinterlüftung" oder etwa als Druckausgleich für die Orgel vorgesehen waren, bleibt im Dunkeln. Der nicht näher beschriebene, insgesamt etwa 50 cm tiefe Hohlraum zwischen innerer und äußerer Dachschalung dahinter wurde, wohl hauptsächlich zur Wärmedämmung, mit einem grobfaserigen Material, einer Art Holzfaserplatte (ca. 5 cm dick), auf so genannten „Torfotektplatten" lose aufliegend, versehen. Die vermutlich während des Krieges eingedrungene Feuchtigkeit hat, wie *Bild 9* zeigt, stellenweise erhebliche Schäden in dieser Isolierung hervorgerufen, die insgesamt – auch aus wärmetechnischen Gründen – dringend nach einer Sanierung verlangt.

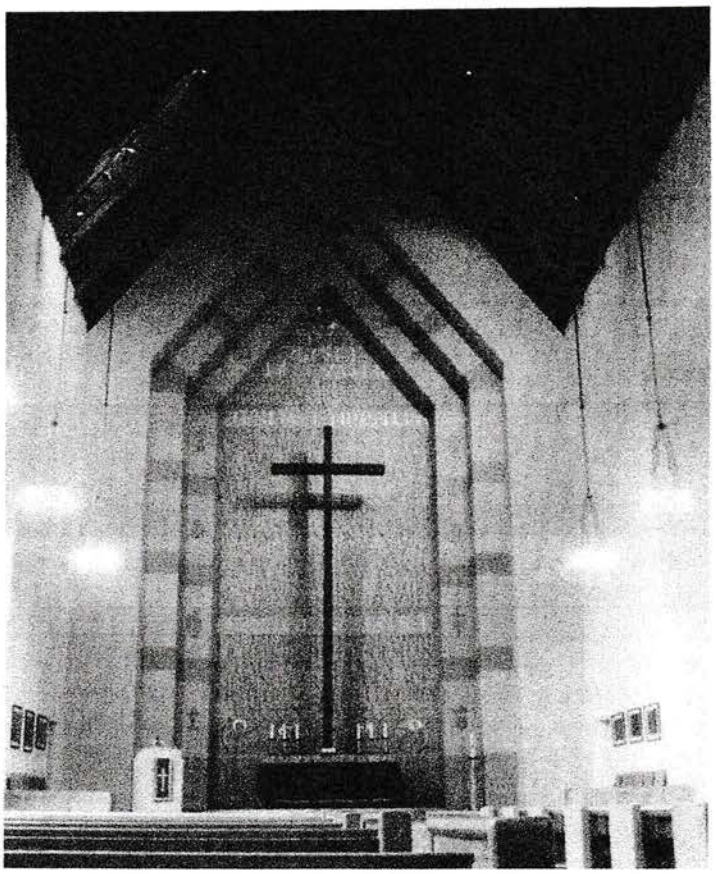

Bild 10. Heutige Innenansicht der Kirche zum Altarraum (Foto: *H. Sander*).

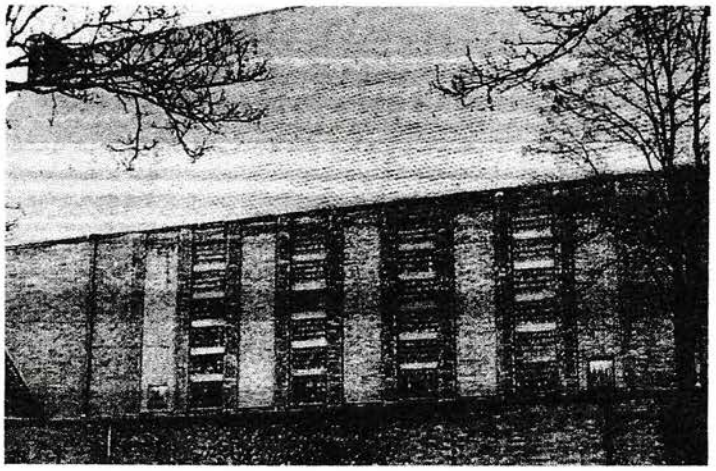

Bild 11. Die noch notdürftig verschlossenen Fenster der Kirche im Jahre 1958 [9].

Exzellente Akustik als unerwartetes Ergebnis

Entgegen diesen Erwartungen und Befürchtungen waren alle Verantwortlichen und Nutzer sofort von der Akustik der neuen Kirche begeistert. Man würdigt schon 1932 das Ergebnis mit Worten wie *„Die akustischen Fragen hat J. Biehle mit bestem Erfolg bearbeitet"*[11]. Von der aus schalltechnischer Vorsicht in eine Saalecke verbannten Kanzel *(Bild 5)* gingen ab 1933 klare Worte besonders von *M. Niemöller* aus, die auch weit über die Gemeindegrenzen hinaus aufmerksam gehört wurden, bis dieser 1937 als ein Wortführer der *Bekennenden Kirche* verhaftet wurde. Aber erst 1990 wurde das Rednerpult aus der Raumecke neben den Altar verlegt (siehe *Bild 10*) – ohne jeden Verlust an Sprachverständlichkeit (auch *ohne* ELA-Verstärkung!).

Im Kriege wurden nur das Dach etwas beschädigt und alle Glasfenster zerstört. Ab 1949 trennte man zunächst den Raum unter der Empore als „Winterkirche" ab, deckte das Dach von außen neu und verschloss die Fenster je zur Hälfte mit Flaschenglas und Mauerwerk *(Bild 11)*. Um diese Zeit war auch die Musikabteilung des *Rundfunks im Amerikanischen Sektor* auf der Suche nach einem geeigneten Aufnahme-Saal für das frisch gegründete *RIAS-Symphonieorchester*. Behelfsweise genutzt wurde bis dahin der einzige in West-Berlin unbeschädigt gebliebene, aber akustisch schlechte Kino-Saal des *Tita-*

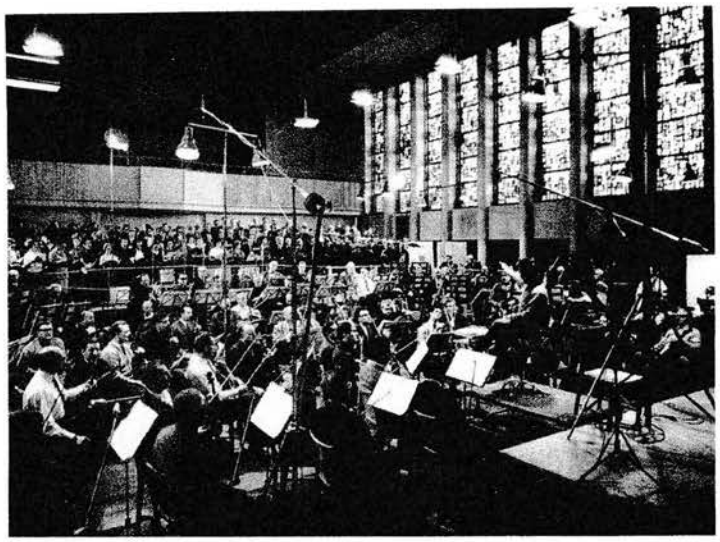

Bild 12. Großes Orchester und Chor während Aufnahmearbeiten in der heutigen Kirche [16].

nia-Palastes in Steglitz mit seinen undurchhörbaren und konturlos wabernden Tiefen. Der schon beim Reichsrundfunk tätige Tonmeister *H. Opitz* machte dann auf die Dahlemer Kirche aufmerksam. Mit ihm zusammen war *P. K. Burkowitz* nach sehr überzeugenden Probeaufnahmen jahrelang dort mit RIAS-Aufnahmen tätig, u. a. dem gesamten Kantatenwerk von *J. S. Bach.*

Bald darauf „entdeckten" aber auch die *Berliner Philharmoniker* mit *W. Furtwängler* diesen Raum in all seiner damaligen Notdürftigkeit, aber mit einer überragend guten Akustik. Auch die ersten Aufnahmen der *Deutschen Grammophon Gesellschaft* DGG verliefen überaus positiv und *„fortan gab es von Kammermusik bis Sinfonieorchester nichts, was irgendwo sonst schöner klang"* [9]. Danach folgten weltweit beachtete Aufnahmen unter *H. v. Karajan, C. Abado, S. Rattle u.a.* Aber auch gefeierte Solisten wussten und wissen den Raum für Konzerte wie für Aufnahmen zu schätzen, z. B. *E. Gilels* mit *Beethoven*-Sonaten. Inzwischen ist er so gefragt, dass er nur noch zeitweilig für seine ursprüngliche Bestimmung von einem Tonstudio *(Bild 12)* in ein Gotteshaus zurück verwandelt wird. Dessen Organistin, *R. Wirth,* schwärmt von ihrem Instrument, das die *Fa. Hammer* 1970 gebaut hat: *„Ihr besonderer Charakter, zusammen mit der guten Akustik, ist das genaue Pendant zur Wortkirche, denn sie klingt so, wie es die gesprochenen Worte immer mindestens anstreben: hell und klar. Andere Orgeln in anderen Kirchen mögen ihren Reiz in einem vielleicht romantischen, weichen, durch langen Nachhall verschwommenen Klang haben. Unsere aber beeindruckt die Hörer nicht durch erschütternde Klangmassen, sondern verschafft ihnen Durchblick, erreicht nicht nur ihre Herzen und Gemüter, sondern auch ihre Köpfe, ermöglicht ihnen, Linien zu verfolgen, macht die Musik durchsichtig"* [13].

Der die Höhen betonende Nachhall

Diese herausragende raumakustische Qualität der *J. Christus-Kirche* war von *J. Biehle* so gewiss nicht vorauszusehen oder gar geplant. Sonst hätte er wohl nicht die oben zitierten massiven Bedenken angemeldet. Bereits die frühen Dokumentationen [11, 12] weisen zwar darauf hin, dass die Raumakustik hier gut gelungen sei: *„Bei dem verhältnismäßig hohen Innenraum der Kirche ... waren starke Bedenken erhoben worden. Infolge der reich gegliederten, z.T. offenen Lamellendecke mit dahinter liegendem Hohlraum ist die Hörsamkeit eine sehr gute. Zum Beispiel kann auf einen Schalldeckel über der Kanzel verzichtet werden"* [12].

Aber erst nach der „Vereinnahmung" dieses Kirchenraumes durch die Musik-Schaffenden wurden überhaupt einige Messungen durchgeführt. Da sonst in diesem Raum nichts Auffälliges gegenüber anderen etwa gleich großen Sälen festzustellen war, hat man sich dabei meist auf seine Nachhallzeit, und zwar über den *gesamten* relevanten Frequenzbereich von 63 Hz bis 8 kHz, konzentriert. Die jüngste der Messungen in *Bild 13* zeigt maximal 3 s um 1 kHz im unbesetzten Raum ohne Gestühl. Selbst im mit einigen Musikern besetzten Zustand weist er in diesem Frequenzbereich Nachhallzeiten weit über den von DIN 18041 für Sprache (1,3 s) und Musik (1,8 s) empfohlenen auf. Gegenüber dem Ursprungszustand war bei allen Messungen nur das Volumen durch den abgetrennt gebliebenen Vorraum von 8400 auf heute noch ca. 7900 m³ reduziert. Es sei aber an dieser Stelle betont, dass die positive Einschätzung der Akustik dieses Raumes durch die Musiker und das Auditorium ganz unabhängig von der Besetzung und von der Zuhörerzahl gilt.

Wenn man für alle übrigen Begrenzungsflächen und das Gestühl wieder die oben abgeschätzten Absorptionsgrade annimmt, ergibt sich aus einer Nachhallzeit von unter 3 s nach *Bild 8* für die Dachschrägen ein $\alpha_D > 0{,}6$ für 1 kHz. Zu tieferen Frequenzen steigt der Absorptionsgrad der Decke sogar bis auf über 0,9 an, wenn man um

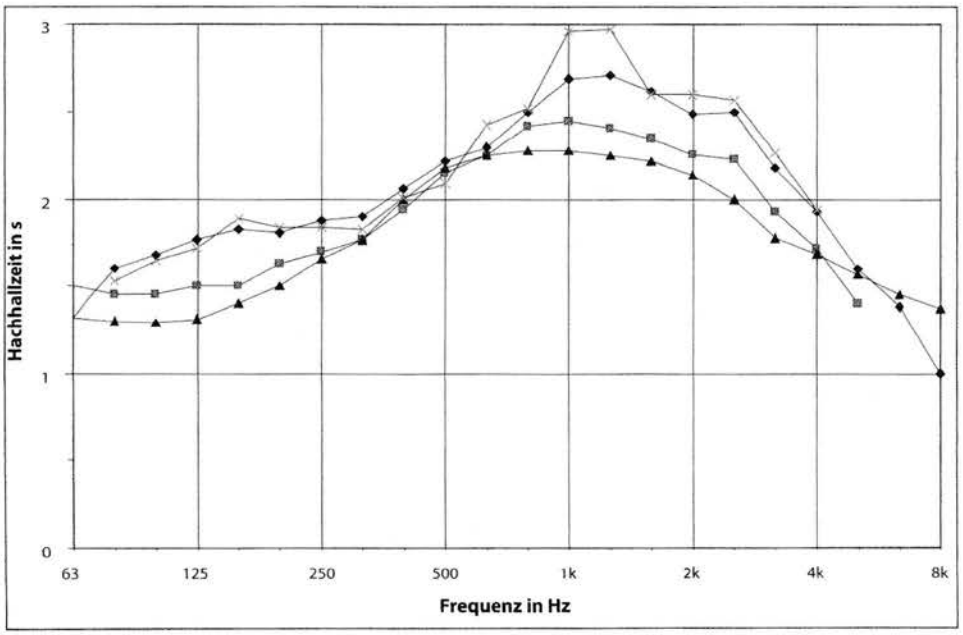

Bild 13. Nachhallzeit in der *Jesus-Christus-Kirche*, gemessen zwischen 1952 und 1963 bei unterschiedlicher Bestuhlung und Besetzung mit Musikern nach [16].

100 Hz für die „schallharten" Flächen weiterhin $\alpha \approx 0{,}05$ und für alle anderen mit Holz oder Glas besetzten Flächen $\alpha \approx 0{,}25$ ansetzt. Diese in einem außerordentlich breiten Frequenzbereich zunächst unglaublich hoch erscheinende Absorption ist nach eingehender Inspektion des ganzen Dachbereiches dadurch zu erklären, dass durch die Schlitze in der inneren Holzverschalung offenbar ein riesiger Hohlraum zwischen den beiden Dachschalen und in den hohen Gängen über den Seitenschiffen angekoppelt ist, der stark bedämpft erscheint.

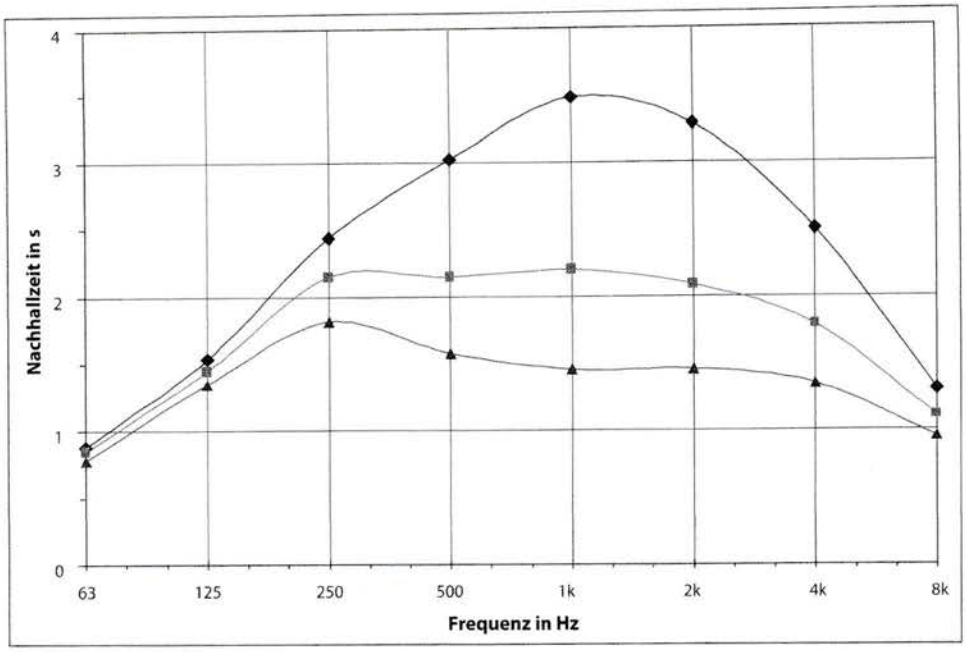

Bild 14. In der „Bachkirche" nach ihrer Restaurierung im Jahre 1999 *(Bild 15)* gemessene und auf zwei Besetzungszustände umgerechnete Nachhallzeiten nach [10].

Die Schöpfer dieses Kirchenraumes lagen mit ihrer Vermutung also richtig, dass seine gute Akustik vor allem auf die Gestaltung der großen Deckenfläche zurückzuführen ist. Bedeutsam sind aber wohl weniger die Holzlamellen mit ihren Breiten, die den Wellenlängen im für Sprache wichtigen kHz-Bereich entsprechen, sondern ein hier wohl eher zufällig gebildeter „Schlitzabsorber", wie er ausführlich in [7, Abschn. 6.2] beschrieben wird, der gegenüber konventionellen Lochplatten- oder *Helmholtz*-Resonatoren einen verbreiterten und zu tieferen Frequenzen verschobenen Wirkungsbereich aufweist.

Bild 15. Innenansicht der „Bachkirche" in Arnstadt [10].

Selbst wenn der Kirchenraum und auch die Empore mit 1000 Besuchern voll besetzt wären, was bisher allerdings nur selten der Fall ist, würde sich eine von ca. 1,5 s bei 1 kHz zu tieferen Frequenzen immer noch sanft abfallende Nachhallzeit einstellen. Hier soll nicht weiter darauf eingegangen werden, wie man dieses als optimal anzusehende Ergebnis mit modernen Mitteln, ohne einen derart großen Raumbedarf, in kommunikationsintensiv genutzten Mehrzweckräumen für Sprache und Musik zur großen Zufriedenheit ihrer zahlreichen Nutzer realisiert hat, siehe [7, 8].

Auch in viel älteren Kirchen von großer musikhistorischer Bedeutung, die in einem ganz anderen Baustil sowie mit anderen Strukturen und Materialien errichtet wurden, hat man übrigens Nachhallspektren vorgefunden, die denen in Bild 13 sehr ähnlich sehen [10]. *Bild 14* zeigt z. B. gemessene und umgerechnete Nachhallzeiten in der unversehrt gebliebenen „Bachkirche" in Arnstadt *(Bild 15)* mit einem Volumen von 6900 m³, kurz nach ihrer Restaurierung im Jahre 1999 [10]: *„Unter Berücksichtigung der zu Bachs Zeit rohen Holzoberflächen von rund 1900 m², die in einem weiten Frequenzbereich eine etwas höhere Absorption als heute aufwiesen, ... ergibt sich die barocke Nachhallkurve par excellence, die auch durch ein Maximum um 1000 Hz geprägt wird"*. Darin sieht *J. Meyer* einen besonderen Vorteil: *„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 resultiert. 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"*. Ähnliche Schlussfolgerungen finden sich in [10] zu den akustischen Verhältnissen in der „Thomaskirche" in Leipzig zu *J. S. Bachs* Zeiten.

Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang aber, dass es genau diese Nachhall-Charakteristik war, welche die Planer des ehemaligen DDR-Rundfunkzentrums in Berlin-Oberschöneweide veranlasst hat, Mitte der 50er-Jahre die akustischen Daten des dortigen großen Sendesaales 1 nach dem Vorbild der *Jesus-Christus-Kirche* einzurichten. Hierzu ist eine ausführliche Dokumentation von *G. Herzog* und *G. Steinke* in Vorbereitung, die eine Fülle von Stellungnahmen und Beurteilungen vieler namhafter Dirigenten verschiedener Epochen enthalten wird, siehe auch [14]. Auch heute noch beweisen die singulären akustischen Qualitäten der in beiden Räumlichkeiten ent-

standenen Aufnahmen die Richtigkeit der hier angebotenen Erklärungen und Folgerungen. Nach *E. Meyer* [10] war das Maximum des Nachhalls um 1000 Hz in der *Jesus-Christus-Kirche* auch der Grund für *H. v. Karajans* Wunsch, dass auch die neue *Philharmonie* in Berlin in diesem Frequenzbereich eine Anhebung aufweisen sollte, die dort allerdings viel schwächer ausfiel.

Vorteile für die Raumnutzung

Ob es nun Absicht oder Zufall war, dass Kirchen (als die frühesten Räume für die Darbietung von Sprache und Musik vor großen Auditorien) seit der Barockzeit in raumakustisch unbestritten herausragenden Beispielen einen zu den Tiefen abfallenden Nachhall aufweisen [10]: Der von Vielen propagierte und nach *Bild 1 rechts* unten für Musik sogar anzustrebende Anstieg der Nachhallzeit bei Frequenzen unter 250 Hz ist zwar in späteren Bauwerken fast zum Regelfall geworden, an den man sich inzwischen wohl auch allgemein gewöhnt hat – ein Optimum stellt er aber keinesfalls dar, weder *funktional* (3) noch *ergonomisch* (2).

Allerdings fällt es in der zeitgenössischen Architektur mit ihren bevorzugt schallharten Baumaterialien in kleinen wie in großen Räumlichkeiten schwer, dem hier propagierten Ziel eines zu den Tiefen (zumindest im leeren Zustand) abfallenden Nachhalls zu kommen. Selbst in relativ flachen Arbeits-, Schul- und Freizeiträumen [2], die ganzflächig mit einer nur mittlere und hohe Frequenzen stark absorbierenden „Akustikdecke" ausgestattet wurden, steigt die Nachhallzeit zu den Tiefen regelmäßig mehr oder weniger stark an. Weil diese Maßnahme aber schon eine große ergonomische Verbesserung gegenüber den akustisch ganz unbehandelten Räumen bedeutet und man allgemein nichts Besseres gewohnt ist, gibt man sich auch in Räumen mit eigentlich sehr hohen funktionalen Ansprüchen leider allzu oft mit einem allenfalls mittelmäßigen Ergebnis zufrieden.

Deshalb erscheint eine Klärung der von so vielen namhaften Nutzern für Sprache und Musik gleichermaßen gerühmten Akustik der *J. Christus-Kirche* wichtig: Das Nachhallzeit-*Spektrum* schafft offenbar eine zentrale Voraussetzung für eine „perfekte" Akustik, für die es nach [4] auch nach Jahrzehnten intensiver Forschungs- und Befragungsarbeit keine eindeutigen Kriterien gibt, die objektive Befunde und subjektive Eindrücke in Einklang bringen. Die hier dargestellten Erkenntnisse sollten aber nicht nur die mit anspruchsvollen Aufnahmen beauftragten Instanzen „verinnerlichen". Sie sollten auch alle Orchester-Musiker ermuntern, sich für ihre anspruchsvolle und anstrengende, oft genug sogar ihr Gehör schädigende Arbeit in Räumen zum Darbieten, Aufnehmen, aber auch zum Proben, Einspielen und Unterrichten nicht jede Akustik gefallen zu lassen, sondern darauf zu dringen, dass in den vielen schlecht bis sehr schlecht konditionierten Räumen endlich etwas zur Erleichterung ihrer Arbeit und zur Verbesserung ihrer „Performance" getan wird. Das „Know-how" und die „Hardware" stehen hierfür seit langem marktgerecht und preiswert für einen gezielten unauffälligen Einsatz zur Verfügung [1, 8]. Dabei sollte vorab u. a. mit dem fest sitzenden Vorurteil aufgeräumt werden, dass „viel Holz" gleich „gute Akustik" bedeutet und im Übrigen hier Magie und Zufall regierten.

Schlussfolgerungen

Seit ca. 15 Jahren wirbt der erste Autor, zusammen mit seinem damaligen Team am *Fraunhofer IBP*, für mehr Aufmerksamkeit und bessere Materialien zur Behandlung der tiefen Frequenzen in der Raumakustik, siehe z. B. [15]. Inzwischen konnte in zahlreichen Sanierungs- und Neubauvorhaben demonstriert werden, wie sich z. B. die Arbeitsbedingungen und -ergebnisse von Musikern beim Proben, Darbieten und Aufnehmen durch eine optimale Gestaltung des Nachhalls im Raum grundlegend verbessern lassen, siehe z. B. [8]. Der zweite Autor, der wohl an die 70 Jahre Erfahrungen aus Höreindrücken und Musikaufzeichnungen mit unterschiedlichsten Techniken gewinnen konnte, ist der festen Meinung, dass der Frequenzbereich von 16 bis 250 Hz eine ganz eigenständige Bedeutung für den gesamten Klang-Kosmos hat (wohl wissend, dass von 63 Hz abwärts die korrekte Reproduktion progressiv schwieriger wird). In diesen 4 Oktaven manifestiert sich das Fundament aller zusammengesetzten Klänge, auch die zum Klangerlebnis wesentlich beitragenden Einschwingvorgänge und Nebengeräusche der Musikinstrumente und Gesangsstimmen.

Beide Autoren ergänzen sich in der Überzeugung, dass es höchste Zeit ist, sich über ein optimales Frequenzspektrum des Nachhalls in Räumen für jegliche sprachliche und musikalische Nutzung klar zu werden, und zwar nicht nur hinsichtlich ergonomischer und ökonomischer, sondern auch hinsichtlich klangästhetischer Aspekte [16]. Um ihren bauphysikalischen und aufnahmetechnischen Argumenten Nachdruck zu verleihen, diskutieren die Autoren ihr von herkömmlichen Vorstellungen und Gewohnheiten stark abweichendes raumakustisches Konzept anhand der gleich lautenden Nachhall-Charakteristik von zwei akustisch herausragenden Kirchen der Zeit *J.S. Bachs* (der *Bachkirche* in Arnstadt und der *Thomaskirche* in Leipzig vor ihrer Renovierung) sowie zwei ebenso weltweit wegen ihrer ausgezeichneten Akustik gepriesenen Zentren für erstklassige Musik-Produktionen (der *Jesus-Christus-Kirche* in Berlin-Dahlem und dem großen Sendesaal des ehemaligen DDR-Rundfunks in Berlin-Oberschöneweide).

Sie sind sich dabei klar darüber, dass eine optimale, zu den tiefen Frequenzen *abfallende* Nachhallzeit unter den heute vorherrschenden architektonischen und bautechnischen Bedingungen nicht leicht erreichbar ist. In zahlreichen Neubau- und Sanierungsprojekten konnte jedoch vorgeführt werden [7], dass eine solche Nachhall-Charakteristik, mindestens aber eine frequenzunabhängige Nachhallzeit wie z. B. im Großen Haus des Staatstheaters Mainz, durchaus ohne Einschränkungen bei der Gestaltung und Nutzung der Räume realisierbar ist. Jedenfalls ist den Empfehlungen der erst 2004 verabschiedeten DIN 18041 unbedingt zu widersprechen, die (unter Ausnutzung der Grenzen in *Bild 1*) sogar eine von den höchsten zu den tiefsten Frequenzen kontinuierlich *ansteigende*

Nachhallzeit eigentlich für wünschenswert, mindestens aber für tolerierbar erklärt.

Gegenüber den hier vorgetragenen Argumenten und den jahrzehntelangen praktischen Erfahrungen aus zunächst scheinbar weit auseinander liegenden Arbeitsfeldern müssen die in der einschlägigen Literatur immer wieder vorgetragenen und nachstehend aufgeführten Gründe für einen zu den Tiefen ansteigenden Nachhall allmählich doch verblassen:

(a) Alle menschlichen Stimmen und Musikinstrumente, auch ein voller Orchesterklang, strahlen ein zu tiefen Frequenzen abfallendes Schallspektrum ab,
(b) das menschliche Ohr weist eine zu den Tiefen geringere Empfindlichkeit bzw. höhere Hörschwelle auf,
(c) die Kurven gleicher Lautstärke rücken zu tiefen Frequenzen immer enger zusammen.

Diesen 3 „Defiziten" meint die in DIN 18041 zementierte Lehrmeinung mittels einer geringeren Dämpfung und eines stärkeren Nachhalls bzw. eines langsameren Abklingens der tiefen Töne gegenüber den höheren entgegen wirken zu können. Abgesehen davon, dass die These (a) nicht stimmt, wenn Schallquellen ihren Maximalpegel bei ihren Grundtönen haben und diese z. B. bei einem Pizzicato der Kontrabässe viel länger nachklingen als die Obertöne, ist die Vorstellung, man könne ein Defizit im Bassbereich durch mehr Tiefton-Nachhall kompensieren, ein fundamentaler Irrtum. Tatsächlich kommt es für das unmittelbare Hören (Konzertsaal) und, mehr noch, für das mittelbare Hören (Übertragung) nicht nur auf Pegel und Lautstärke, sondern auch auf Präsenz und Kontur der Schallquellen am Ohr des Hörers an.

Als Maß für die Durchhörbarkeit einer Stimme, eines Instrumentes, bietet sich der stark frequenzabhängige, so genannte Hallabstand r_H in m nach [10] an, bis zu welchem der Direktschall den Diffusschall (der sich aus den Mehrfachreflexionen im Raum zusammen setzt) derselben Quelle überwiegt,:

$$r_H = 0{,}057\ \Gamma(f)\sqrt{\frac{V}{T(f)}} \qquad (4)$$

Darin bedeutet Γ den Richtfaktor der jeweiligen Quelle, welcher den Schalldruck in einer bestimmten Richtung im Verhältnis zum Schalldruck beziffert, der sich im selben Abstand einstellen würde, wenn die Quelle ihre Schallleistung völlig gleichförmig in einen reflexionsfreien Raum abstrahlen würde.

Alle Instrumente bzw. Stimmen sind so gebaut bzw. angeboren, dass sie ihre Schallenergie möglichst gut zu einem oder mehreren Zuhörern (oder auch Mikrofonen) hin übertragen können. Dies gelingt ihnen aber grundsätzlich bei tiefen Frequenzen viel schlechter als bei hohen. Bass-Instrumente, beispielsweise die Tuba, strahlen nach [10] unter 125 Hz fast kugelförmig ab (z. B. $\Gamma < 1{,}5$), bei 400 Hz schon mit $\Gamma = 2{,}0$, aber bei 2000 Hz sogar mit 6,6! Diese Tendenz lässt sich natürlich allein durch eine mit der Frequenz entsprechend wachsende Nachhallzeit T(f) in s im Raum gemäß Gl. (4) nicht kompensieren. Es erscheint aber geradezu widersinnig, für einen zu den Tiefen ansteigenden Nachhall zu plädieren. Vielmehr sollte man durch gezielte raumakustische Maßnahmen (starke frühe Reflexionen in der Nähe der Bass-Instrumente und Tiefen-Absorption im Raum) überall für einen möglichst gut durchhörbaren, markanten Direktschallanteil auch im Tiefton-Bereich sorgen. In [17] wurden für diese Thesen mit *E. Skudrzyk, G.v. Bekesy, W. Reichardt, H. Kuttruff* und *E. McCue* bereits einige namhafte Zeugen aus der Vergangenheit ausführlich zitiert. Die Autoren sind sich dennoch recht klar darüber, dass es noch einiger Überzeugungsarbeit bedarf, um bei den Akustik-Beratern und -Planern für die Zukunft im Hinblick auf die Bedeutung der tiefen Frequenzen ein generelles Umdenken zu bewirken.

Literatur

[1] *Fuchs, H.V.:* Der Raum spielt mit – Weniger Schallbelastung durch akustische Gestaltung des Orchesterraumes. Das Orchester 55 (2007) H. 7/8, S. 10–16.

[2] *Fuchs, H.V.* und *Renz, J.:* Raumakustische Gestaltung offener Bürolandschaften. Bauphysik 28 (2006) H. 5, S. 305–320.

[3] *Burkowitz, P.K.* und *Fuchs, H.V.:* Das vernachlässigte Bass-Fundament – Zur Behandlung der tiefen Frequenzen beim Darbieten, Aufnehmen und Wiedergeben von Sprache und Musik. VDT-Magazin, H. 1-2009, im Druck.

[4] *Witew, I.B.:* Zur subjektiven Bewertung der Akustik in Konzertsälen: Gibt es die perfekte Akustik? VDT-Magazin, H. 1-2006, S. 19–23.

[5] *Fasold, W.; Sonntag, E.* und *Winkler, H.:* Bau- und Raumakustik. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1987.

[6] *Ahnert, W.* und *Tennhardt, H.-P.:* Raumakustik. In: Weinzierl, S. (Hrsg.): Handbuch der Audiotechnik, Kap. 5. Berlin: Springer, 2008.

[7] *Fuchs, H.V.:* Schallabsorber und Schalldämpfer. Innovative akustische Konzepte und Bauteile mit praktischen Anwendungen in konkreten Projekten. Berlin: Springer, 2007.

[8] *Fuchs, H.V.:* Raumakustische Gestaltung von Umgebungen zum Darbieten, Aufnehmen und Wiedergeben von Sprache und Musik. Bauphysik 29 (2007) H. 6, S. 398–406.

[9] *Leiberg, T.:* Jesus-Christus-Kirche Berlin-Dahlem. Evangelische Kirchengemeinde Berlin-Dahlem, 1991.

[10] *Meyer, J.:* Kirchenakustik. Frankfurt a.M.: Bochinsky, 2003.

[11] *Horn, C.:* Die kirchliche Bautätigkeit der letzten Jahre. Kunst und Kirche 9 (1932) H. 1/2, S. 3–12.

[12] *Bachmann, J.:* Jesus-Christus-Kirche in Berlin-Dahlem. Deutsche Bauzeitung 1932, S. 287–290.

[13] *Dekara, O.* et al.: 75 Jahre Jesus-Christus-Kirche Berlin-Dahlem. Evangelische Kirchengemeinde Berlin Dahlem, 2006.

[14] *Steinke, G.:* Room-acoustical and technological aspects for multichannel recordings of classic music. AES-Convention 2002, Paper 5561.

[15] *Hunecke, J.* et al.: Schallaufnahmen in historischen Räumen. Stellwände aus Membran-Absorbern im Musiksaal des Schlosses Solitude. Das Orchester 42 (1994) H. 3, S. 9–11.

[16] *Burkowitz, P.K.:* Psychoakustische Verformungen der Wahrnehmung von aufgenommenem Schall. Tonmeister-Informationen/VDT-Magazin (2006), H. 1, S. 10–18.

[17] *Fuchs, H.V.:* Neufassung von DIN 18041 – ein Weckruf für gute Raumakustik. Bauphysik 25 (2003) H. 6, S. 350–357.