

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology



DIPLOMARBEIT

Kulturzentrum für Musik und Theater in Wiener Neudorf

Die Wechselbeziehung zwischen Architektur und Akustik in der Entwicklung des Konzertsaalbaus

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Caroline Jäger-Klein

E251-1

Institut für Kunstgeschichte, Bauforschung und Denkmalpflege

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Tran Lap Vinh Georg

0126130

Kaiserstraße 26, 1070 Wien

Georg.Tran@gmx.at

Wien, am 8. Juni, 2011

Einleitung	1
1 Architektur und Akustik – Räume zum Hören.....	3
1.1 Ein Konzertsaal in Schuhschachtelform: der Goldene Saal in Wien	3
1.2 Die Raumakustik als Wissenschaft: Symphony Hall in Boston	6
1.3 Die Entwicklung bis Mitte des 20. Jahrhunderts	9
1.4 Der Direktschall-Saal: Grande Salle Pleyel in Paris	10
1.5 Einzug der Moderne: Royal Festival Hall in London.....	12
1.6 Der HiFi-Konzertsaal: Philharmonic Hall in New York	15
1.7 Neue Hörgewohnheiten im 20. Jahrhundert: die Philharmonie in Berlin	17
1.8 Variable Akustik, variable Anforderungen: der Mehrzwecksaal.....	20
1.9 Ein zeitgenössisches Beispiel: das KKL Luzern	21
1.10 Zusammenfassung	23
2 Raumakustik – Theorie und Praxis.....	25
2.1 Raumakustische Grundsätze und Begriffe	25
2.1.1 Physikalische Grundlagen und Definitionen	25
2.1.2 Schallquellen	27
2.1.3 Schallempfindung und Schallwirkung – Lautstärke	32
2.1.4 Schallausbreitung in Räumen – Schallabsorption und Schallreflexion.....	35
2.1.5 Raumakustik und musikalische Qualitäten	45
2.1.6 Raumakustik und Komposition	51
2.2 Konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung der Raumakustik	52
2.2.1 Raumakustische Kriterien.....	53
2.2.2 Raumakustische Planung – Ziele und Methoden	58
2.2.3 Ausführungsbeispiele	67
2.3 Zusammenfassung	70
3 Entwurf eines Kulturzentrums für Musik und Theater in Wiener Neudorf.....	73
3.1 Standort und Geschichte der Gemeinde	73
3.2 Die Alte Volksschule und die Alte Feuerwehr am Angerplatz.....	76
3.3 Konzept.....	78
3.4 Raumprogramm.....	83
3.4.1 Alte Volksschule – Schwerpunkt Theater	83

3.4.2	Alte Feuerwehr – Schwerpunkt Musik	84
3.5	Erschließung und Funktion	85
3.5.1	Alte Volksschule.....	85
3.5.2	Alte Feuerwehr.....	85
3.6	Berechnung der Nachhallzeit und raumakustische Maßnahmen	86
3.6.1	Überschlags-, Annäherungs- & Rechenmethoden.....	87
3.6.2	Raumakustische Maßnahmen	88
3.6.3	Berechnungstabellen	90
3.7	Energiekonzept.....	93
3.8	Planzeichnungen	94
3.9	Details	106
3.10	3D-Visualisierungen.....	112
	Schlussbemerkung.....	119
	Literaturverzeichnis.....	121
	Anhang.....	123

Einleitung

Architektur und Akustik sind unmittelbar miteinander verbunden und beeinflussen sich wechselseitig. Über diesen Zusammenhang wurde in der Architekturgeschichte lange hinweggesehen, bis sich Anfang des 20. Jahrhunderts ein neues Bewusstsein für die Raumakustik als ernstzunehmende Wissenschaft entwickelte. Die Raumakustik musste sich schon immer mit anderen entwurfsrelevanten Faktoren wie z.B. Ästhetik, Funktionsumfang und Wirtschaftlichkeit messen und wurde meist in der Priorität nachgereiht. So muss man sich heute fragen, welchen Stellenwert die Akustik in der Architektur einnimmt.

Diese Arbeit besteht aus drei Teilen, einem vorbereitenden historischen Teil, einem Grundlagen erklärenden technischen Teil und der hauptsächlichen Entwurfsübung. Der historische Teil dient dazu, einen Überblick über musikalische Aufführungsstätten zu schaffen, die hinsichtlich ihrer Beziehung zwischen Architektur und Akustik von Relevanz sind, und ihre architektonischen Qualitäten zu bewerten. Zusammen mit den darauf folgenden Grundkenntnissen über die Raumakustik im technischen Abschnitt soll der anschließende Entwurfsteil erfüllt werden. Die These lautet: Wie sind die bisherigen Ergebnisse in der Geschichte des Konzertsaalbaus mit der gleichzeitigen Entwicklung der Raumakustik verknüpft und in welchem Maße war bzw. ist folglich die Raumakustik für den architektonischen Entwurf von Räumen für Musik und Sprache noch relevant? Es soll überprüft werden, wie bestehende und tradierte Entwurfsprinzipien im Konzertsaalbau mit den heutigen Anforderungen an einen modernen Kommunalbau mit akustischem Schwerpunkt zu vereinbaren sind und welche Ansätze dabei zur Anwendung kommen.

Die Quellensuche zum Thema Konzertsaalbau gestaltete sich behäbig. Einen allgemeinen Überblick über Konzertsäle und Opernhäuser mit Schwerpunkt auf zeitgeschichtliche und gesellschaftliche Zusammenhänge bietet das Buch „Bauwerke für Musik“ (1992) von Michael Forsyth. Dagegen beschreibt „Music, Acoustics & Architecture“ (1962) von Leo Beranek erstmals die Zusammenhänge zwischen Akustik und Architektur ausschließlich aus der Sicht eines Musiktheoretikers und Akustikers. Ergänzend zu erwähnen ist ebenfalls Beraneks „Concert Halls and Opera Houses“ (2004), eine Kompilation von für die Raumakustik relevanten Eckdaten von über hundert Konzertsälen und Opernhäusern. Das Buch ist eine Zweitaufgabe des Werkes „Music, Acoustics and Architecture“ (1962), welches erweitert und aktualisiert wurde.

Anders verhält es sich zum Thema Raumakustik, wo mittlerweile einige aussagekräftige und umfassende Werke zu finden sind. Als Referenz für das zweite Kapitel des theoretischen Teils diente das Werk „Schallschutz und Raumakustik in der Praxis“ (2003)

von Wolfgang Fasold, welches sich wissenschaftlich mit den Grundlagen der Raumakustik auseinandersetzt und in späteren Kapiteln Lösungsansätze für verschiedene Bautypologien anbietet. Einen interessanten Einblick in die Geschichte des Entwurfsstandortes ergab ein persönliches Gespräch mit Kurt Janetschek, seines Zeichens Stadtarchivar von Wiener Neudorf und Autor sowie Herausgeber der Chronik „Wiener Neudorf – Im Wandel der Zeit“ und der Archivmitteilungen Wiener Neudorfs, die in unregelmäßigen Abständen erscheinen.

Die These wird überprüft, indem die Geschichte des Konzertsaalbaus abschnittsweise und exemplarisch mit dem jeweiligen Wissensstand auf dem Gebiet der Raumakustik verbunden wird. Dann erfolgt zusätzlich eine Bewertung aus architektonischer Sicht, deren Ergebnisse in den Entwurf eines Kulturzentrums für Musik und Theater in Wiener Neudorf einfließen.

So zeigt Kapitel 1 in geraffter Form und ohne Anspruch auf Vollständigkeit die Entwicklung des Konzertsaalbaus anhand einer Auswahl an Bauwerken, die eine spezielle Beziehung zwischen Architektur und Akustik aufweisen und direkten oder indirekten Einfluss auf den Entwurf nahmen. Kapitel 2 erklärt die wichtigsten raumakustischen Grundkenntnisse, die bei der akustischen Planung von Aufführungsstätten zu berücksichtigen sind, und beschreibt die konstruktiven Maßnahmen, die dabei zur Anwendung kommen können. Diese beiden Kapitel bilden die Grundlage für Kapitel 3, welches eine Entwurfsübung darstellt. Da es sich bei diesem Entwurf um eine Umnutzung von zwei bestehenden Gebäuden an einem bestimmten Standort handelt, werden hier zuerst der geschichtliche Hintergrund der Gemeinde Wiener Neudorf und die baulichen Gegebenheiten vorort genauer beschrieben. Es folgt die Vorstellung von Raumprogramm und Entwurf. Im nächsten Schritt werden die Berechnungen der Nachhallzeiten und die raumakustischen Maßnahmen zur Optimierung der Nachhallzeiten angegeben, bevor ein grobes Energiekonzept, die Planzeichnungen, Details und 3D-Visualisierungen folgen. Im Anhang befinden sich noch detaillierte Berechnungen des Wärmedurchgangs für eine Auswahl an Bauteilen.

1 Architektur und Akustik – Räume zum Hören

Dieses Kapitel besteht aus einer Auswahl an Bauwerken, die hinsichtlich der Beziehung zwischen Architektur und Akustik besonderes Interesse wecken. Sie stellen gewisse Meilensteine, Wendepunkte oder Anomalien in der Konzertbauarchitektur dar, wobei es sich um Referenzen einer bestimmten Bauform (wie z.B. der Wiener Musikverein als Konzertsaal in Schuhschachtelform), aber auch um architektonische Misserfolge (wie z.B. der Salle Pleyel als Direktschall-Saal) handeln kann. Es wird jeweils einleitend auf den geschichtlichen Hintergrund der Beispiele eingegangen, um sie historisch zu verorten und miteinander in Kontext zu bringen. Anschließend werden die architektonischen Aspekte beleuchtet, welche mit den raumakustischen Eigenschaften in einem Zusammenhang stehen, der ebenfalls näher erläutert werden muss.

Die Anfänge des Konzertsaalbaus liegen in London des frühen 18. Jahrhunderts, wo die ersten Bauten ausschließlich für Musikaufführungen errichtet werden, um Konzerte aus dem privaten Rahmen von kleinen Hof- und Salonkonzerten zu befreien und einer breiteren Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Gegen Ende des 18. Jahrhunderts verlagert sich die Entwicklung des Konzertsaalbaus auf das europäische Festland, wo vor allem im deutschsprachigen Raum neue Akzente gesetzt werden und im Laufe des 19. Jahrhunderts der Konzertsaaltyp in Schuhschachtelform zum gängigsten Typus avanciert. Diese Bauform ist deswegen in England kaum zu finden, da dort die Konzertsaalbautradition älter als jene in Europa ist.

1.1 Ein Konzertsaal in Schuhschachtelform: der Goldene Saal in Wien

Dieser Konzertsaaltyp stammt vom höfischen Ballsaal ab, der in den Jahrhunderten zuvor üblicherweise für die privaten Konzertaufführungen der Adelligen verwendet wurde. Damals konnten aufgrund des mangelnden Wissens über Akustik nur wenige brauchbare Schlüsse über die Wechselwirkung von Bauform, Materialien und Raumakustik gezogen werden. Deswegen wurden die vorhandenen Raumformen imitiert bzw. bestehende Konzertsäle studiert und adaptiert. Die Akustik war in hohem Maße von der Architektur abhängig, da raumakustische Phänomene nicht erklärt werden konnten. Um diese Zeit entstanden teils absurde Mythen um die Raumakustik, die für heutige Verhältnisse naiv anmuten, aber damals durchaus zur Anwendung kamen¹.

Der typische Konzertsaal in Schuhschachtelform ist rechteckig mit hoher Decke und schmalen Seitenwänden, welche sich aus der damaligen Limitierung von zu überwindbaren Spannweiten durch Balkendecken ergeben. Der Fußboden ist eben, da er ebenso als

¹ Siehe auch BERANEK, *Music, Acoustics and Architecture*, 1962, S. 4 ff.

Tanzfläche und Parkett für festliche Veranstaltungen dienen muss, und die Künstlerbühne ist erhöht. Das Auditorium wird optional von einer Galerie entlang den Wänden gesäumt. Die Nachhallzeit ist im Vergleich zu Sälen einer anderen Bauform lang und sorgt somit für ein volles und lautes Klangbild, was den Musikstücken der damaligen Musikepochen z.B. der Romantik sehr entgegenkam.

Der **Große Saal im Wiener Musikverein** (1867–1869), wegen seinen reichlichen Verzierungen auch **Goldener Saal** genannt, zählt zu den besten Konzertsälen seiner Art. Das Gebäude, vom dänischen Architekten Theophil von Hansen (1813–1891) entworfen, wurde im Zuge der Ringstraßenerweiterung gemeinsam mit der Staatsoper, dem Burgtheater und weiteren Ringbauten errichtet.

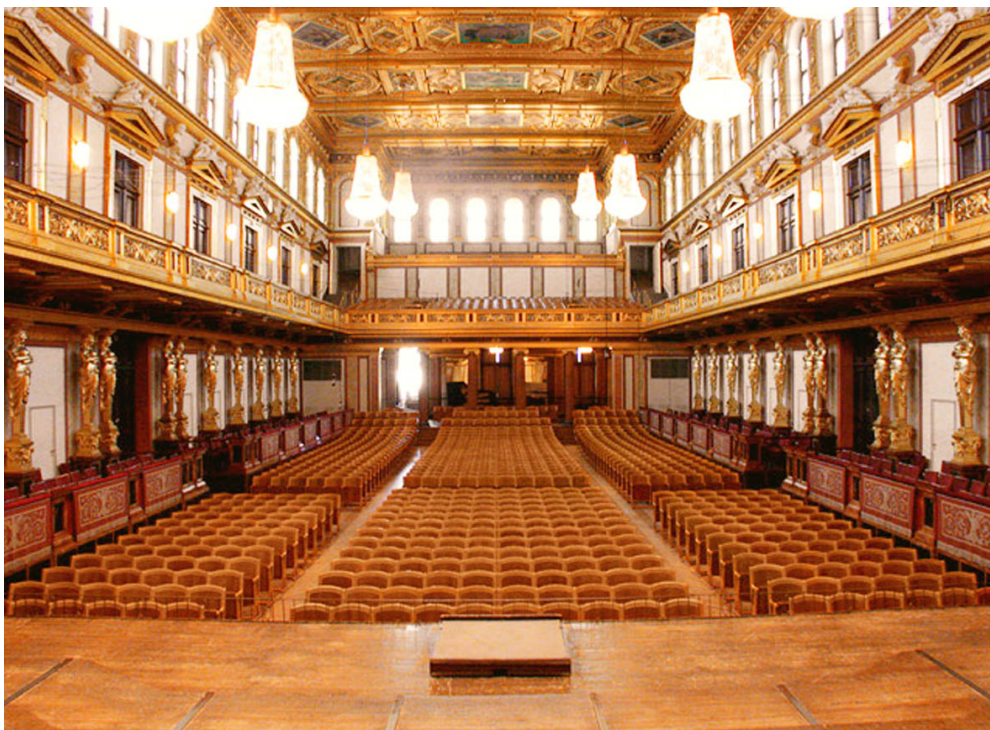


Abb. 1: Wiener Musikverein, Goldener Saal
(<http://www.musikverein.at/dermusikverein/galerie/musikvereinssaal.asp>, 17.02.2011, 12:00)

Das Gebäude gliedert sich durch sein von außen schlicht gehaltenes Erscheinungsbild gut in die Stadtumgebung ein. Der Goldene Saal, neben vier weiteren Sälen der größte Saal, ist etwa 16.500 m³ groß, hat die Maße 48,8 x 19,1 x 17,7 m (l x b x h) und fasst 1.744 Sitz- und 300 weitere Stehplätze². Eingebettet im Gebäudeinneren lässt sich die rechteckige Bauform auf den angesprochenen Ballsaaltypus zurückführen und ist nicht städtebaulich begründet. Die Erschließung erfolgt auf zwei Ebenen und ermöglicht so ein rasches Zu- und Abströmen des Publikums. Eine Zugangsebene erfolgt zu den niedrigen Galerien an den Längsseiten und dann zum ebenen Parkett, die andere führt über

² Musikverein Wien, <http://www.musikverein.at/dermusikverein/musikvereinssaal.asp>, 03.03.2011, 13:00

außenführende Stiegen zu der saalumlaufenden Empore, die auf der Bühnenrückwand in einen Orgelchor mündet.

Die verputzten Oberflächen der Seitenwänden mit über vierzig Fenstern und zwanzig Türen sind unregelmäßig gestaltet und die Decke ist mit goldenen Stuckarbeiten versehen. Der Saal ist reich mit plastischen Skulpturen und Säulenreihen dekoriert, was hauptsächlich die Vorliebe des Architekten für den strengen Historismus wiedergibt, aber in weiterer Folge den ausgezeichneten Klang des Saals bedingt. Die zahlreichen Einbauten erzeugen nämlich durch diffuse Schallstreuungen eine Ausgewogenheit von Durchsichtigkeit und Räumlichkeit. Von Hausen wollte in erster Linie einen Prestigebau in Konkurrenz zur Staatsoper errichten und legte dabei zugegebenermaßen größeres Augenmerk auf die innere Erscheinung als auf den Klang, dennoch weiß dieser glücklicherweise zu überzeugen. Die Nachhallzeit bei den mittleren Frequenzen, also jenem Frequenzbereich, der für die Klanggüte von Musik besonders wichtig ist, beträgt bei voller Besetzung knapp über 2 s. Die Bässe werden aufgrund des Wandverputzes voll und ausgeprägt wiedergegeben, und die geringe Breite des Saales bewirkt eine gleichmäßige Versorgung aller Plätze mit den wichtigen ersten Reflexionen.

Die Qualitäten der Schuhschachtelform

Die Geschichte des Konzertsaalbaus zeigt, dass im 19. Jahrhundert die Akustik oft völlig vernachlässigt wurde, was verschiedene Gründe haben kann. Einerseits wurde die Klanggüte oft hinter dem Repräsentationswert oder anderen Faktoren gereiht, andererseits fehlte das technische Wissen, um die Klanggüte gezielt verbessern zu können. So ist es wohl auch zum Teil dem glücklichen Zufall zu verdanken, dass in jener Zeit einige der besten Konzertsäle entstanden, nämlich jene in Schuhschachtelform, zu denen der Wiener Musikverein, das erste Neue Gewandhaus in Leipzig und das Concertgebouw in Amsterdam zählen. Diese Musterbeispiele weisen grundlegenden Gemeinsamkeiten auf, die sich auch in ihren folgenden Derivaten wiederfinden:

- Die Sitzbereiche sind relativ klein. Im Vergleich zu den großen Konzerthäusern des 20. Jahrhunderts mit oft über 3.000 Plätzen erzeugt die kompakte Sitzanordnung eine klangliche Intimität und gewährleistet eine gewisse Nähe zur Bühne. Die Distanz des am weitesten entfernten Zuhörers, ein relevante Größe in der Raumakustik, wird somit gering gehalten.
- Die Decke ist vergleichsweise hoch. Dadurch vergrößert sich das Raumvolumen, und Nachhallzeiten von bis zu 2 s sind trotz der unvermeidbaren Absorptionen durch das Publikum möglich. Ein präsenter Nachhall verleiht der Musik Lautstärke und klangliche

Wärme, lässt sie homogener klingen und bindet die einzelnen Noten zu musikalischen Läufen.

- Die Räume sind relativ schmal. Jeden Besucher erreichen daher neben Direktschall frühe, erste Schallreflexionen aus der Bühnennähe bei einer angemessenen Lautstärke, was vor allem für die Räumlichkeit der Musik und für die klare Ortung der einzelnen Instrumentengruppen wichtig ist. Die Schmalheit der Räume ist, wie bereits erwähnt, eher auf fehlende Technologien und Materialien als auf eine bewusste Entscheidung zugunsten der Klanggüte zurückzuführen.
- Ein akustischer Nachteil ist der ebene Fußboden, der für verschiedene Anlässe verwendbar sein soll. Bei einer niedrigen Bühne streift der Direktschall die Köpfe der Zuschauer und verliert dadurch bis in den hinteren Saalbereich deutlich an Schallenergie³. Die hinteren Plätze sind vor allem von den Reflexionen von Decke und Seitenwänden abhängig, was bei mangelndem Direktschall zu einer klanglichen Unausgewogenheit führt. Eine Erhöhung der Bühne ändert den Schalleinfallswinkel und wirkt diesem Problem entgegen.

1.2 Die Raumakustik als Wissenschaft: Symphony Hall in Boston

Bis Ende des 19. Jahrhunderts beruhte die Klanggüte der Aufführungsstätten weitestgehend auf Erfahrungswerten (trial and error) und Glück. Die Architekten verwendeten z.B. eher aus ästhetischen als aus raumakustischen Gründen dünne Holzpaneele zum Verkleiden der Wände. Diese Platten absorbierten die tiefen bis mittleren Frequenzen und sorgten dafür, dass der dominante Bassanteil der Musik nicht übermäßig laut wurde und somit nicht den kritischen Bereich der Stimmlage des Sängers oder des Soloinstrumentes überdeckte. Die Wände der Konzertsäle wurden aus Kostengründen meistens nur mit Gips verputzt, was aber den Schall gleichmäßig über das volle Frequenzspektrum reflektierte und die Musik voller und lauter erklingen ließ. Die Säle wurden wegen den möglichen Deckenspannweiten schmal gehalten, was vor allem die Räumlichkeit und Direktheit der Musik unterstützte.

Die **Boston Symphony Hall** (1900) stellt einen Wendepunkt in der bisherigen Geschichte des Konzertsaalbaus dar. Zum ersten Mal arbeiteten ein Architekt, Charles Follen McKim (1847–1909), und ein akustischer Berater, Wallace Clement Sabine (1868–1919), zusammen an einem ganzheitlichen Bauprojekt, das sowohl ästhetisch als auch akustisch dem damaligen Zeitgeist entsprach und gleichzeitig überdauern sollte. Die Raumakustik als junge Wissenschaft findet zum ersten Mal ihre verdiente Beachtung und steht auf

³ Siehe auch Kapitel 2.2.2.2

einer Stufe mit der Architektur. Sabine bediente sich zwar noch einer akustischen Referenz, nämlich des ersten Neuen Gewandhauses (1884–1944), welches seinerzeit einen sehr guten Ruf für die Akustik genoss, aber ließ ebenfalls konkrete raumakustische Maßnahmen in den architektonischen Entwurf einfließen.



Abb. 2: Symphony Hall in Boston, Innenraum
(FORSYTH, *Bauwerke für Musik*, 1992, S. 252)

Der Saal ist etwa 18.745 m^3 groß, hat die Maße $52 \times 22,9 \times 18,6 \text{ m}$ (l x b x h) und fasst 2.625 Zuschauer⁴. Die klassische Schuhschachtelform mit den schmalen Seitenwänden ergab sich weder aus städtebaulichen noch aus materialbedingten Gründen, sondern wurde von Sabine bewusst ausgewählt. Das Auditorium wird auf drei Ebenen erschlossen, dem Parterre und zwei Balkonreihen. Um der Klanggüte des Vorbildes, das mit 10.618 m^3 um einiges kleiner ausfiel, möglichst genau zu entsprechen, müsste laut Sabine auf jede notwendige Abänderung wie z. B. die größere Anzahl an Sitzplätzen mit der passenden akustischen Maßnahme geantwortet werden.

Folgende Faktoren tragen zu Klanggüte der Boston Symphony Hall bei:

- Die Schuhschachtelform nach dem Vorbild des Neuen Gewandhauses.
- Die ideale Nachhallzeit von 1,8 s im vollbesetzten Saal bei mittleren Frequenzen, die mit der Deckenhöhe reguliert wird und nur geringfügig von den angepeilten 1,55 s des Neuen Gewandhauses abweicht.

⁴ Vgl. BERANEK, *Concert halls and opera houses*, 2004, S. 50

- Die bewusste Wahl der Materialien: Mauerverputz im Publikumsbereich, dicke Holzverkleidungen im Bühnenbereich, Holzparkettboden, Bestuhlung mit Minimum an Bepolsterung, erhöhte mitschwingende Holzbühne.
- Gezielte konstruktive Maßnahmen: Die Balkonreihen sind schmal gehalten, um unbeabsichtigte Reflexionen an Ober- und Unterseite gering zu halten. Die Kassetten-decke mit ausgeprägtem Relief sowie die Wandnischen und Statuen zerstreuen den Schall und sorgen für Ausgewogenheit im Klangbild. Die Bühnenwände und –decke sind angeschragt und verteilen die Musik gleichmäßig zum Publikum.

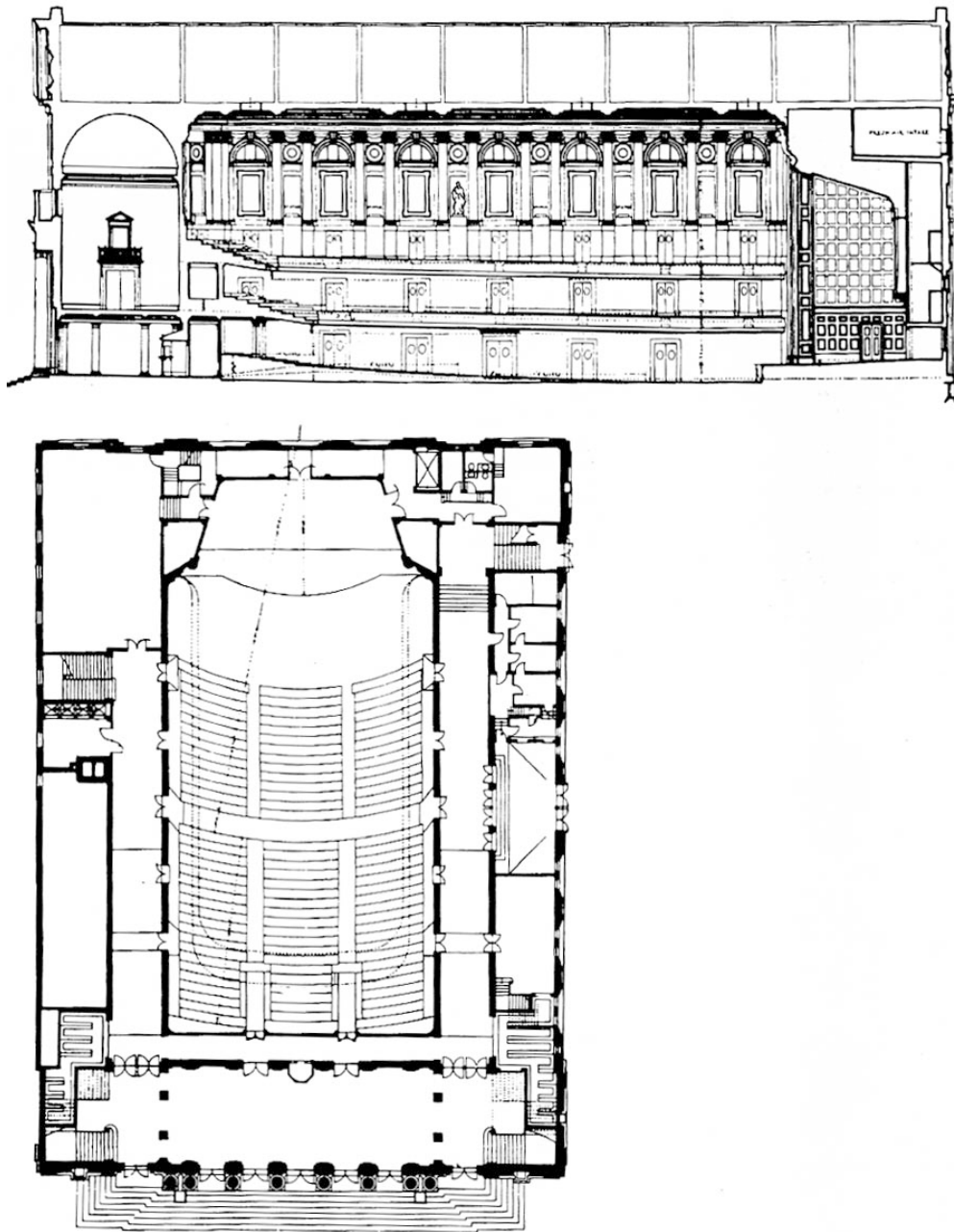


Abb. 3: Symphony Hall in Boston, Grundriss und Schnitt
(FORSYTH, *Bauwerke für Musik*, 1992, S. 253)

1.3 Die Entwicklung bis Mitte des 20. Jahrhunderts

Am Anfang des 20. Jahrhunderts steckte die Raumakustik als Wissenschaft zwar noch immer in den Kinderschuhen, wurde aber mehr und mehr demystifiziert und in nachvollziehbare Formeln übertragen, womit auch ihr Relevanz für die damaligen architektonischen Entwürfe stieg. Auch wenn die bisher willkürlichen Baumaßnahmen einer raumakustischen Berechenbarkeit wichen, hieß das nicht, dass die kommenden Konzertsäle ausnahmslos von ausgezeichneter Klanggüte waren. Unvollständigerweise wurden die erforderlichen raumakustischen Maßnahmen alleinig von der neuentdeckten Nachhallzeit abgeleitet. Grundform, Oberflächenbeschaffenheit und Wahl der Materialien wurden jedoch weniger in die Überlegungen miteinbezogen, womit auf einige Variablen in der Gleichung verzichtet wurde.

So wurde in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts in einer anfänglichen Euphorie noch reichlich mit Raumformen und Materialien experimentiert. Neue technologische Errungenschaften wie Eisen- und Stahlskelettkonstruktionen erlaubten große freitragende Balkone, die über hundert Zuschauer fassten. Neben dem wirtschaftlichen Effekt, die Platzkapazität an die wachsende Nachfrage nach kulturellen Bauten anzupassen, ermöglichten die auskragenden Galerien bessere Sichtverhältnisse für mehr Besucher, als es bisher bei den geschlossenen, entlang der Wand gereihten Logensystemen möglich war. Ein guter Sitzplatz war nicht mehr nur den Privilegierten vorbehalten, sondern für jedermann verfügbar. Einzig die Sitzplätze direkt unter der Vorkragung waren teilweise leiser, da weniger Schall von der Decke dorthin reflektiert werden konnte. Obwohl das Wissen um die Wechselwirkung zwischen Architektur und Akustik vorhanden war, wurde trotzdem allzu oft ein klanglicher Kompromiss zugunsten der Wirtschaftlichkeit eingegangen.

Die neue Generation von Konzertsälen ist vor allem im nordamerikanischen Raum verbreitet, wohin sich die Entwicklung des Konzertsaalbaus nach dem gesättigten europäischen Markt verlagerte. Diese Konzertsäle klingen anders als ihre Vorgänger übermäßig klar und steril und geben die Musik beinahe in Aufnahmequalität wieder. Der Grund dafür war nicht vordergründig eine klangliche Anpassung an die zeitgenössischen Werke, die von Dissonanzen und ungewohnten Rhythmiken gekennzeichnet waren und von nachhallarmen Sälen profitierten, sondern der steigende Platzbedarf. Das Publikum bildete in einem Auditorium die größte schallabsorbierende Fläche, die nochmals durch die zugunsten der Bequemlichkeit vergrößerten Sitzflächen zunahm. Die neuen Konzertsäle wuchsen in die Breite, um die Sitzreihen zu verlängern. Somit war der Raumklang wesentlich von den Schallreflexion der Decke abhängig, die deswegen sehr niedrig gehalten wurde, um die mangelnden Seitenreflexionen zu kompensieren. Problematisch war neben der fehlenden Räumlichkeit die auffällig starke Dämpfung des tiefen Fre-

quenzbereiches durch die Verwendung von falschen Oberflächenmaterialien, was das Orchester scharf und kühl klingen ließ und auf Dauer den Zuhörer ermüdete. Die damalige Entwicklung der Konzertsäle wurde von den Musikern argwöhnisch mitverfolgt. Sie forderten in den neuen Sälen mehr Lebendigkeit und Klangvielfalt.

Was die Beziehung zwischen Architektur und Akustik betrifft, ist es interessant, dass trotz des vorhandenen Wissens über Raumakustik und der technologischen Fortschritte die Klanggüte eines Konzertsaals sogar im 20. Jahrhundert wieder einen Nebenrolle einnimmt. Zuvor waren es Präsentationsdrang und mangelndes Wissen über die Raumakustik und jetzt war es der wirtschaftliche Gedanke, der den Hauptzweck eines Konzertsaals, nämlich den bestmöglichen Rahmen zur Wiedergabe von Musikstücken zu bieten, wieder in den Hintergrund drängte.

1.4 Der Direktschall-Saal: Grande Salle Pleyel in Paris

Zwischen 1920 und 1940 gab es zu diesem herrschenden Konzertsaaltyp einen Gegenbewegung, die den Stellenwert der Akustik über den der Architektur heben wollte. Die Architektur dürfe der Akustik nicht im Wege stehen, was ein löblicher gedanklicher Ansatz war, aber in der Umsetzung bei den damaligen technischen Möglichkeiten scheitern sollte. Die Verfechter dieser These wollten in ihren Entwürfen die Akustik im Freien nachahmen. Dies war eine direkte Antwort auf die riesigen Auditorien, in denen das Risiko von akustischen Mängeln wie z.B. Echos mit der Raumgröße wuchs und die augenscheinlichste Gegenmaßnahme das Vermeiden von Schallreflexionen war.

Der Akustiker F. R. Watson kam in seinem Buch „Acoustics for Buildings“ (1930) zu dem Schluss, dass alle akustischen Fehler auf reflektierten Schall zurückzuführen seien und reflektierende Oberflächen nur in der Nähe von Rednern und Musikern von Nutzen wären⁵. Folglich müsse der ideale Saal klanglich dem Freilufttheater entsprechen, wo nur auf der Bühne Schallreflektoren installiert würden, der Publikumsbereich aber von störenden Schallreflexionen befreit sein müsse. Angelehnt an Watsons Theorien waren einige europäische Architekten der Ansicht, dass ausschließlich der direkte Schall von der Bühne die Klanggüte eines Auditoriums bestimme und der Nachhall komplett zu vernachlässigen sei. Deswegen müsse der Schall mit allen Wand- und Deckenflächen, und nicht nur von der Bühne, direkt auf das Publikum gelenkt werden.

Der **Grande Salle Pleyel** (1927) in Paris wurde von Gustave Lyon (1857–1936) als erster Direktschall-Saal entworfen. Der Saal ist etwa 15.500 m³ groß, hat die durchschnittlichen

⁵ Vgl. FORSYTH, *Bauwerke für Musik*, 1992, S. 259 f.

Maße von 49 x 25,6 x 18,6 m (l x b x h) und fasste ursprünglich 2.386 Personen⁶. Die Erschließung erfolgt auf drei Ebenen, eine führt direkt zum Parterre, die beiden anderen leiten die Zuschauer über das Stiegenhaus zu den von der Rückwand weit auskragenden Balkonreihen.

Die Saalform leitet sich direkt von raumakustischen Erwägungen ab, womit erstmals in der Geschichte des Konzertsaalbaus die Akustik die Architektur bedingt. Laut Lyon dürfen die ersten Reflexionen des Direktschalles von der Bühne für das Publikum nicht hörbar sein, um eine gute Prägnanz des Klanges zu gewährleisten und Echos zu vermeiden. Dies sei dann der Fall, wenn der Zeitabstand zwischen Schallereignis und erster Reflexion weniger als ein Fünfzehntel einer Sekunde betragen würde, was bei einer Schallgeschwindigkeit von 340 m/s einen Wegabstand von etwa 22 m bedeutete. Deswegen ist das Auditorium so gestaltet, dass die Länge der ersten Reflexionen, die von Decke und Wände auf das Publikum geworfen werden, nie um jene 22 m länger als die Länge des Direktschalls ist. Daraus ergibt sich ein trichterförmiger Grundriss und Schnitt ähnlich einem Grammophon.

Der Konzertsaal wurde Lyons akustischen Vorstellungen nicht gerecht. Der Musik wurde hauptsächlich in den hinteren Publikumsbereich geleitet, so dass die Künstler sich kaum hörten. Auf der Bühne wiederum erzeugten Reflexionen von der glatten Rückwand ein deutliches Echo. Die Trichterform wirkte darüber hinaus auch in die entgegengesetzte Richtung, was dazu führte, dass Publikumsgeräusche ebenfalls auf der Bühne verstärkt wahrgenommen wurden. Dem Konzertsaal fehlte jeglicher Nachhall, da der Direktschall sofort auf den schallabsorbierenden Publikumsbereich geworfen wurde. Um der Freiluftakustik noch mehr zu entsprechen, war der komplette Boden mit Teppichen ausgelegt und die Balkone mit schallabsorbierenden Materialien verkleidet.

Im Laufe des 20. Jahrhunderts konnten mit fortschreitendem Wissensstand die meisten akustischen Mängel ausgebessert werden: ein Bühnenüberdachung wurde hinzugefügt und ein Großteil der Schallabsorber wurde wieder entfernt bzw. an der Rückwand angebracht. Die Musikaufführungen hatten nun die geforderte Klangdefinition, entbehrten aber wegen der starken Deckenreflexionen und fehlenden Seitenreflexionen einer musikalischen Räumlichkeit. Zwischen 2004 und 2006 wurde die Sekundärstruktur des Saals erneut umgeändert und die Sitzplätze wurden auf 1.913 reduziert.

⁶ Vgl. BERANEK, *Concert halls and opera houses*, 2004, S. 275

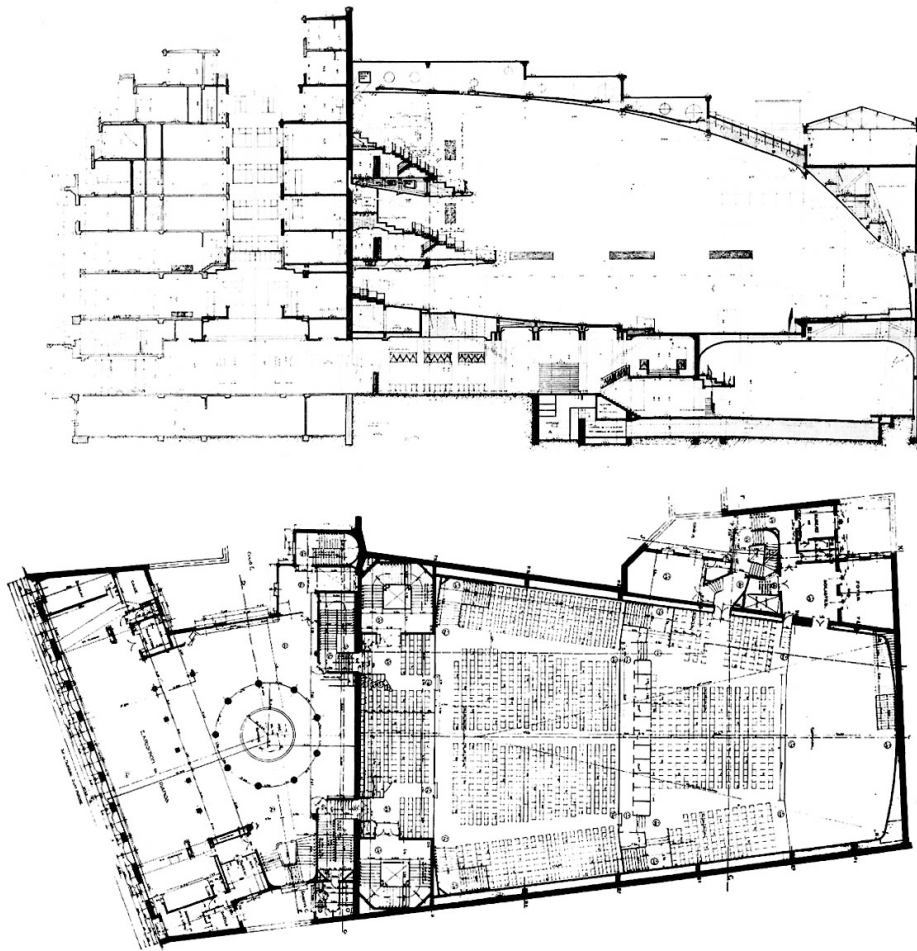


Abb. 4: Salle Pleyel, 1927, Schnitt + Grundriss
(FORSYTH, *Bauwerke für Musik*, 1992, S. 266f)

1.5 Einzug der Moderne: Royal Festival Hall in London

Die bisherige Geschichte des Konzertsaalbaus zeigte, dass jede Hauptströmung eine Gegenströmung hervorrief. Während in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts viele Konzertsäle den akustischen Anspruch zugunsten anderer Faktoren in den Hintergrund drängten, versuchten trotzdem einige Architekten, in ihren Entwürfen Akustik und Architektur gleichwertig zu behandeln. Dass die Ergebnisse nicht an die Klanggüte der alten Konzertsäle, die noch immer als akustische Referenzen über jeden Zweifel erhaben waren, heranreichten, lag vor allem an den unzureichenden Kenntnissen über die Raumakustik und an den fehlenden Technologien. Dennoch sollte dieser Anspruch der Gleichstellung von Architektur und Akustik gewürdigt werden. Auch dem nächsten Beispiel gelang es bei der Ersteröffnung nicht vollkommen, die ambitionierten Zielsetzungen zu erfüllen, doch der technologische Fortschritt, der die vergangenen Jahrzehnte erfolgt war, brachte den entscheidenden Vorteil gegenüber früheren gescheiterten Sälen wie z.B. dem Salle Pleyel.

Im Zuge eines Wiederaufbauprogramms in London wurde 1951 die **Royal Festival Hall** eröffnet, die von Robert Matthew und Leslie Martin mithilfe der akustischen Beratung von Hope Bagenal (1888–1979) geplant wurde. Das junge Architektenduo sah seine Aufgabe darin, einen Konzertsaal nach rein musikalischen Anforderungen und nach dem besten Wissensstand auf dem Gebiet der Raumakustik zu entwerfen, ohne sich auf die bestehende Konzertsaalbautradition zu beziehen oder sich primär von wirtschaftlichen Faktoren leiten zu lassen. Das Ergebnis war ein moderner Bau in einer noch nie da gewesenen Stilistik. Der Konzertsaal, der über dem offen gestalteten Hauptfoyer schwebt, sitzt wie ein Ei in einer gläsernen Außenhülle, die einerseits Platz für die Nebenräume und Infrastruktur bietet und andererseits als Antwort auf die zentrale städtebauliche Lage in Southbank Centre das Eindringen von Außenlärm wie Straßengeräusche oder tieffrequentes Motorbrummen verhindern soll.

Der Saal ist 21.950 m³ groß, hat die Maße 58 x 32,3 x 15,2 m (l x b x h) und fasst mit den Balkonplätzen 2.901 Sitzplätze⁷. Der Erschließung erfolgt auf zwei Hauptebenen zu den nach hinten ansteigenden Sitzreihen und der weit auskragenden Galerie, die sehr gute Sicht- und Hörverhältnisse auch auf den hintersten Plätzen ermöglichen. Zusätzliche Erschließungsmöglichkeiten führen zu den an den beiden Seitenwänden angebrachten Balkonen. Die Bühne ist ebenfalls nach hinten erhöht gestuft und sorgt somit für eine gute Durchmischung sowohl der verschiedenen Instrumentengruppen untereinander als auch mit dem Chor. Die hintere Streichergruppe spielt nun über die Köpfe der vorderen Gruppe hinweg.

Die akustische Sekundärstruktur wurde von Anfang an miteingeplant. So befindet sich über der Bühne knapp unter der Decke ein Baldachin, der den Direktschall vom Orchester in den Publikumsbereich lenkt und die Klarheit der Musik unterstützen soll. Um das Risiko von Echos und anderen akustischen Mängeln möglichst gering zu halten, sind die Wände entweder als Schallabsorber oder -reflektoren für tiefe oder mittlere Frequenzen ausgeführt.

Trotz der Größe des Saals liegt die Nachhallzeit unter Bagenals Erwartungen, was sich im Nachhinein durch eine Miskalkulation der schallabsorbierenden Fläche erklären lässt⁸. Der am Baldachin reflektierte Schall wird vom Publikum in den gepolsterten Sitzreihen zu stark geschluckt. So ist der Klang besonders deutlich und artikuliert, hat aber aufgrund des fehlenden Basses kaum Druck und Fülle.

⁷ Vgl. BERANEK, *Concert halls and opera houses*, 2004, S. 248

⁸ Siehe auch FORSYTH, *Bauwerke für Musik*, 1992, S. 271



Abb. 5: Royal Festival Hall in London, Innenansicht
 (<http://www.musicweb-international.com/SandH/2007/Jan-Jun07/philharmonia1206.htm>, 17.02.2011, 12:01)

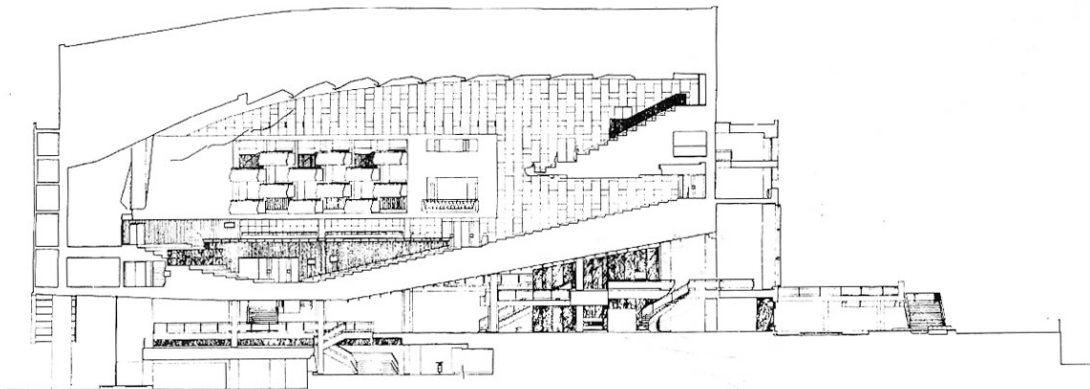


Abb. 6: Royal Festival Hall in London, Schnitt
 (FORSYTH, *Bauwerke für Musik*, 1992, S. 275)

In den 1960er-Jahren wird ein elektroakustisches Beschallungssystem namens „Assisted Resonance“ (das erste seiner Art) zur Erzeugung von künstlichem Nachhall installiert. Eine große Anzahl von Mikrofonen und Lautsprechern wird im Auditorium verteilt, wobei der an den Mikrofonen empfangene Schall so laut über die Lautsprecher wiedergegeben wird, bis akustische Rückkopplungen entstehen. Durch diesen Effekt klingt der Schall länger aus, mit dem entscheidenden Vorteil, dass der künstlich erzeugte Nachhall auf bestimmte Frequenzbereiche beschränkt und die Nachhallzeit reguliert werden kann. So lässt sich die Nachhallzeit in der Royal Festival Hall in den unteren Frequenzen von 1,3 s auf 2,1 s verlängern, was dem Saal die fehlende Wärme wieder gibt.

Aus musikalischer Sicht ist es interessant, dass die Royal Festival Hall mit ihrem scharfen, fast schrillen Klang dem akzentuierten und rhythmischen Musikstil der Moderne zugutekam, denn diese von Dissonanzen geprägten Musikstücke hätten in Konzertsälen mit längeren Nachhallzeiten und schmeichelnderer Akustik wie z. B. im Musikverein nur bedingt funktioniert.

1.6 Der HiFi-Konzertsaal: Philharmonic Hall in New York

Die **Philharmonic Hall** (1959–1962) ist in der Geschichte des Konzertsaalbaus ein tragisches Beispiel dafür, dass selbst bei höchstem akustischen Anspruch und bestem Wissensstand über die Raumakustik die Klanggüte eine untergeordnete Rolle spielen kann, wenn die Akustik an ein rigides Raumprogramm mit Budgetgrenzen angepasst werden muss. Solche Fehlentscheidungen oder kurzfristigen Planänderungen aus wirtschaftlichen Gründen waren leider keine Seltenheit und verdeutlichen, dass der Stellenwert der Akustik für alle Entscheidungsträger während des Planungs- und Ausführungsprozesses gleich sein sollte. Der im Vorfeld betriebene Aufwand stand in keiner Relation zu dem Ergebnis. Der Akustiker Leo Beranek untersuchte die besten Konzertsäle der Welt und führte stundenlange Interviews mit Musikern und Dirigenten, um dieses Wissen in den Entwurf der Philharmonic Hall einfließen zu lassen. Nachdem seine Kompetenz in Frage gestellt wurde, verließ er das Projekt und veröffentlichte schließlich seine Ergebnisse im Buch „Music, Acoustics and Architecture“ (1962).

Das Konzerthaus wurde also von Max Abramovitz mithilfe der akustischen Beratung von Leo Beranek entworfen. Beraneks Wunsch war es, die Intimität der alten Konzertsäle mit dem neuem Wunsch nach Klangdefinition zu vereinen, weswegen der Konzertsaal ursprünglich in Tradition der Schuhschachtelform rechteckig und mit großem Augenmerk auf die Sekundärstruktur ausgeführt werden sollte. Während der Fertigstellung wurden gegen Beraneks Ratschlag einige akustisch fatale Eingriffe getätigt: Es wurden 258 weitere Sitzplätze installiert, die Seitenwände im hinteren Bereich konkav ausgehöhlt und aus Kostengründen auf schallstreuenden Elemente an den Seitenwänden verzichtet. Als Folge blieb die Akustik bei der Eröffnung unter allen Erwartungen. Die Musiker auf der Bühne hörten sich schlecht, die Streicher und Bläser waren viel zu dominant und der Nachhall war im Vergleich zum Direktschall viel schwächer.

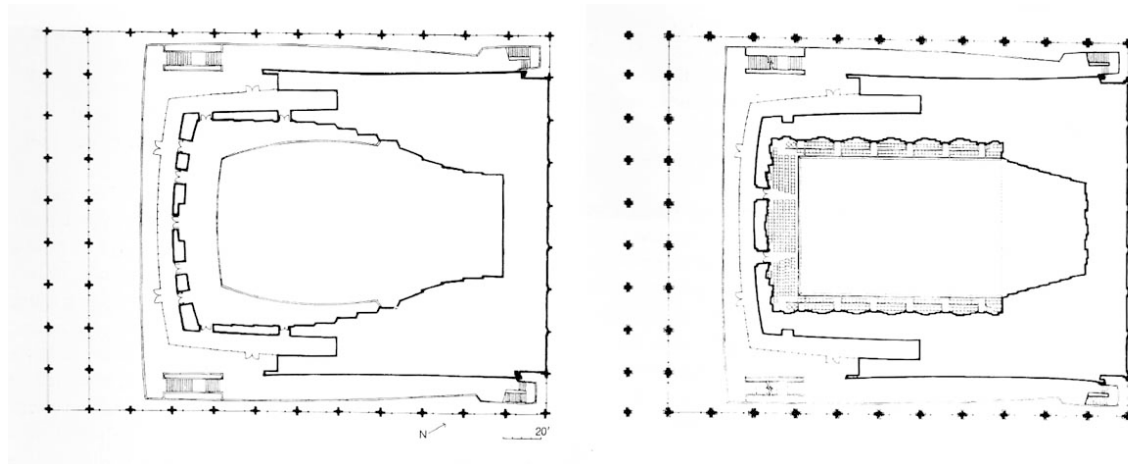


Abb. 7: Philharmonic Hall und Avery Fisher Hall im Vergleich
(FORSYTH, *Bauwerke für Musik*, 1992, S. 287)

In den Siebzigerjahren wurden die Architekten Philip Johnson und John Burgee mit einer kompletten Neugestaltung des Konzertsaaes beauftragt, der im Oktober 1976 als **Avery Fisher Hall** wiedereröffnet wurde. Sie entschieden sich abermals für die Schuhschachtelform, wobei als Vorbild die Boston Symphony Hall diente. Der Saal ist 20.400 m³ groß, hat die Maße 51 x 25,9 x 16,8 m (l x b x h) und bietet für 2.742 Personen Platz⁹. Die Erschließung erfolgt auf vier Ebenen, eine zum Parterre, die restlichen zu den drei umlaufenden Balkonreihen.

Die Sekundärstruktur wurde komplett überarbeitet: Bühnenwände und -decke erhielten große Schallregulatoren und die Balkonfronten sind ebenso wie die strukturierte Decke schallstreuend. Im Vergleich zu Boston wurden die gepolsterten Sitze aus Gründen der Bequemlichkeit breiter eingerichtet, der Saal ist ebenfalls breiter und die Decke niedriger. Die Absorptionsflächen betragen in Boston 1.523 m² und in New York 1660 m² bei etwa gleichem Volumen, was zu einer kürzeren Nachhallzeit in New York führt. Der Klang ist typisch für einen HiFi-Konzertsaal „ehrlich“ und definiert, aber der tiefere Frequenzbereich ist unterrepräsentiert, ganz im Gegensatz zum warmen und vollen Klang in Boston, der vor allem durch den richtigen Nachhall an Lebendigkeit gewinnt.

⁹ Vgl. BERANEK, *Concert halls and opera houses*, 2004, S. 106



Abb. 8: Avery Fisher Hall, 2009, Außen- und Innenansicht
(<http://mikebm.wordpress.com/2009/02/08/architecture-for-music-avery-fisher-hall>, 17.02.2011, 12:03)

1.7 Neue Hörgewohnheiten im 20. Jahrhundert: die Philharmonie in Berlin

Dem technologischen Fortschritt in der Unterhaltungsindustrie (Radio, Fernsehen etc.) ist es zu verdanken, dass die Akustik vermehrt Beachtung erfährt. Der durchschnittliche Musikliebhaber entwickelt sich zu einem audiophilen Kenner, der sehr wohl gute von schlechten Konzertsälen unterscheiden kann. Um den Konzertbesuch wieder interessant zu machen, muss in den neuen Konzertsälen das klangliche Niveau drastisch steigen. In gewisser Weise erfolgt erstmals ein akustischer Anspruch aus wirtschaftlichen Gründen, denn der geschulte Zuhörer erwartet nun mehr als einen bequemen Platz in einem überfüllten Konzertsaal, sonst bleibt er zuhause. Ein gutes Konzert kann er auch auf der heimischen HiFi-Anlage hören.

Das visuelle Element einer Aufführung erhält einen neuen Stellenwert, indem der Zuschauer so nah wie möglich an die Darbietung des Solisten oder des Orchesters geführt werden soll. Nahe Sichtverhältnisse bedingen gute Hörverhältnisse. Außerdem wird der Künstler mit seiner Mimik und Gestik bewusst integriert und der menschliche Aspekt der Aufführung hervorgehoben. Es entsteht eine gemeinschaftliche Atmosphäre zwischen Publikum und Künstlern, indem der Konzertbesuch als ein besonderes Ereignis verkauft wird, das sich von Abend zu Abend ändert. Diese Absichten unterstützt in besonderem Maße ein Auditorium mit zentraler Bühne, wo die Musiker von den Zuhörern ringsum umgeben sind. Das folgende Beispiel vereint diese Forderungen mit dem neuen akustischen Anspruch und zeigt, dass sich Architektur und Akustik sehr wohl ergänzen können und dabei etwas Innovatives schaffen, indem neue Wege abseits der Schuhachtelform beschritten werden.

Einer der ersten Konzertsäle als Zentralbau und eine Ikone des deutschen Expressionismus im 20. Jahrhundert ist die **Berliner Philharmonie** (1963), vom Architekten Hans Scharoun mithilfe des Akustiker Lothar Cremer entworfen. Der Konzertsaal ist 21.000 m³

groß, hat die durchschnittlichen Maße von 110 x 42,7 x 12,8 m (l x b x h) und fasst 2.218 Sitzplätzen plus 120 Plätzen im Chor¹⁰. Dieser Konzertsaal verbindet auf raffinierte Weise den modernen Anspruch an einen Aufführungsort mit der geforderten Klanggüte, wobei schließlich die umgesetzten Wertevorstellungen des Architekten diesen Entwurf komplettieren.



Abb. 9: Berliner Philharmonie, Außenansicht
(http://www.architekt.de/Bauwerke/Berliner_Philharmonie_foto_19.php, 17.02.2011, 12:05)

Nach Scharouns Premisse „Musik im Mittelpunkt“¹¹ soll jedes Element auf das Musikerlebnis vorbereiten, so gibt bereits die auffallende Erscheinung das Innere wieder. Das gläserne Vestibül gibt den Blick auf das Foyer frei, wo die Decke plastisch geformt ist und vereinzelt Lichtstrahlen ins Innere durchlässt. Die zahlreichen Treppen verlaufen in verschiedene Winkeln und führen ins Obergeschoß, vom wo aus das Auditorium an mehreren Zugangspunkten erschlossen wird. Trotz des komplexen Treppensystems sind 44 Sitzplätze für gehbehinderte Zuhörer reserviert.

Die Musiker sind von allen Seiten vom Publikum umgeben. Mit dieser offenen Sitzanordnung sollen die Grenzen zwischen Musikern und Zuhörerschaft verwischt werden. Von keinem Sitzplatz kann das gesamte Auditorium überblickt werden, was nochmals den Fokus auf die Musikaufführung richtet. Der Publikumsbereich ist auf unregelmäßige, offene Logen aufgeteilt, die zu den hinteren Sitzreihen amphitheatralisch ansteigen und

¹⁰ Vgl. BERANEK, *Concert halls and opera houses*, 2004, S. 300

¹¹ FORSYTH, *Bauwerke für Musik*, 1992, S. 303

deren unterschiedlich hohe Parkettfelder an Weinterrassen erinnern. Die zeltförmige Decke, die symbolisch den Himmel über dieser Landschaft darstellt, reflektiert den Schall in die hinteren Logen. Die Frontflächen der Treppungen verteilen die Seitenreflexionen gleichmäßig im Raum und kompensieren somit die fehlenden Seitenwände des Auditoriums. Jeder Zuhörer erhält ausreichend Anfangsreflexionen und zwar innerhalb der kritischen Verzögerungsdauer von 50 ms nach dem Direktschall¹², was den Saal mit Klarheit, Präsenz und Klangausgewogenheit auszeichnet.



Abb. 10: Berliner Philharmonie, Innenansicht
(<http://mikebm.wordpress.com/2008/10/19/architecture-for-music-berlin-philharmonie/>, 24.02.2011, 13:33)

Der amphitheatralischen Sitzanordnung, die zusätzlich durch die Terrassensegmente aufgebrochen wird, gibt Scharouns Vorstellung einer sozialen Gleichstellung wieder. Dadurch erlischt die hierarchische Wertung der Sitzplätze. Weiters ist jedem Zuhörer ein eigener, wiedererkennbarer Platz zugeordnet. Das Auditorium stellt eine gebaute Metapher für die Demokratie dar, wo jedes Individuum einen zugeschriebenen Platz in der Gesellschaft hat.

Das einzige und grundlegende Problem, das in Auditorien mit zentral positionierter Bühne gelöst werden muss, ist die Gerichtetheit des Orchesters, besonders bei Instrumenten wie Bläsern, Streichern oder bei der menschlichen Stimme. Die Zuhörer hinter der Bühne werden immer benachteiligt sein, weswegen die Bühne nicht gänzlich in die Mitte gerückt und den Publikumsbereich hinter der Bühne möglichst klein gehalten werden sollte.

¹² Siehe Kapitel 2.1.3.2 für eine physikalische Beschreibung der Kurzzeiteinwirkungen

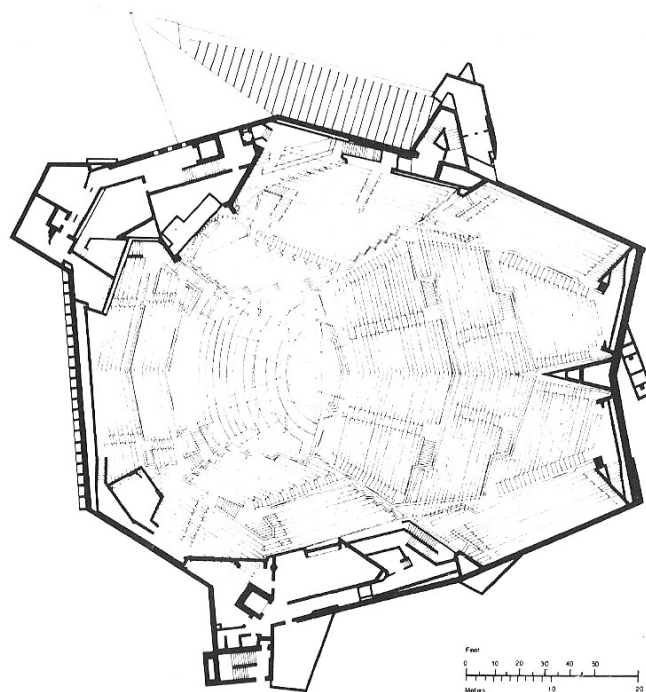


Abb. 11: Berliner Philharmonie, Grundriss
(FORSYTH, *Bauwerke für Musik*, 1992, S. 302)

1.8 Variable Akustik, variable Anforderungen: der Mehrzwecksaal

Ab Mitte des 20. Jahrhunderts entwickelte sich in Nordamerika, wo eine eigenständige Tradition von Konzertsälen und Theatern in Gegensatz zu Europa nie vorhanden war, ein neuer Saalbautyp, der hauptsächlich von wirtschaftlichen Gründen getrieben war. Der **Mehrzwecksaal** sollte nicht nur möglichst viele Personen pro Abend fassen, sondern auch Abend für Abend mit unterschiedlichen Veranstaltungsarten ausgelastet sein.

Der nordamerikanische Mehrzwecksaal war mit Kompromissen geschlagen, denn die klanglichen Anforderungen waren vielfältig und durchaus gegensätzlich, wenn der Saal sowohl für Sprachveranstaltungen wie Lesungen, Tagungen oder Gottesdienste als auch für Aufführungen verschiedener Musikrichtungen wie Symphoniekonzerte, Opern oder Jazz geeignet sein sollte. Die Beziehung zwischen Raum und Musik wurde hier gänzlich umgekehrt, denn diese Säle passten sich nun der Musik an.

Bisher bedingte die Architektur die Akustik oder umgekehrt. Auf jeden Fall war eine Bindung vorhanden, die sich nun langsam auflöste. Möglich war dies erst mit verbesserten Technologien in der raumakustischen Planung: bewegliche Wandelemente, die als

Schallabsorber bzw. –reflektoren wirken können, oder flexible Bühnenschirme, die die Intimität, d.h. die wahrgenommene Größe eines Raumes beeinflussen können.

1.9 Ein zeitgenössisches Beispiel: das KKL Luzern

Unter den Konzertsälen, die in den letzten Jahrzehnten entstanden sind, zählt das Kultur- und Kongresszentrum Luzern zu jenen Bauwerken, bei denen Architektur und Akustik eine symbiotische Beziehung eingehen und sich gegenseitig ergänzen. Das KKL Luzern (2000) wurde von Jean Nouvel mit der akustischen Beratung von Russell Johnson (1924–2007) entworfen und besteht aus drei Gebäudekomplexen (Kongresszentrum, Luzerner Saal und Konzertsaal), die sich unter einem gemeinsamen Dach mit einer Dachfläche von 113 x 107 m befinden. Am Ufer des Vierwaldstättersees kragt das Dach schwebend in die Natur hinaus.



Abb. 12: KKL Luzern, Außenansicht
(<http://finishingnotes.com/2011/03/23/destination-luzern-switzerland-travel-lucerne/>, 09.04.2011, 19:33)

Der Konzertsaal ist ca. 19.000 m³ groß, hat die Maße 46 x 22 x 22 m (l x b x h) und fasst insgesamt 1.840 Personen¹³. Die Erschließung erfolgt auf fünf Ebenen zu dem ebenen Parkett und den vier schmalen Balkonreihen. Der Saal zitiert bewusst die Schuhschach-

¹³ Vgl. http://www.kkl-luzern.ch/navigation/top_nav_items/KKL/Architektur/russel_johnson/default.htm, 09.04.2011, 18:27

telform mit den simplen Proportionen „2 : 1 : 1“ und verbindet somit alle bereits erwähnten Vorteile der Schuhschachtelform mit den modernen Ansprüchen an einen Konzertsaal dieser Größenordnung. Die Wände sind mit über 24.000 quadratischen Gipsplatten verkleidet, die je nach Art des Reliefs den Schall mehr oder weniger streuen. Über der Bühne befindet sich ein zweiteiliger Schallschirm, der in der Höhe verstellt werden kann, und gemeinsam mit der in dunkelblau gehaltenen Decke den Nachthimmel darstellen soll. Damit der Konzertsaal für das komplette Musikrepertoire von der Klassik bis zur Moderne genutzt werden kann, planten Nouvel und Johnson die sogenannten Echokammern ein. Sie umgeben den Konzertsaal bei den Balkonreihen und sind über 50 schwere Betontüren zugänglich. Bei Öffnung aller Türen vergrößert sich das Volumen des Konzertsaals auf 25.000 m³. Somit kann die Nachhallzeit um bis zu drei Sekunden verlängert werden. Eine weitere Regulierung der Nachhallzeit erfolgt durch Vorhänge und macht den Konzertsaal auch für Sprachveranstaltungen oder Jazz- und Popkonzerte tauglich. Der Geräuschpegel konnte auf 18 dB gesenkt werden, indem die Konzertscheinwerfer ohne Lüftung gekühlt werden, die Klimaanlage bei minimaler Luftgeschwindigkeit laufen und der Zutritt zum Konzertsaal über akustisch entkoppelte Zugänge erfolgt.



Abb. 13: KKL Luzern, Konzertsaal
(http://www.lucernefestival.ch/de/ort/kkl_luzern_konzertsaal/, 09.04.2011, 19:33)

Der Konzertsaal ist nur ein Teil eines Gesamtkomplexes, welches mit einem umfangreichen Raumprogramm aufwartet. Es gibt ein Auditorium für Kongresse, den Luzerner Saal für moderne Event-Veranstaltungen, zahlreiche Clubräume, Business- und Medienräume, ein Kunstmuseum und die obligatorischen Gastronomiebetriebe. Das klassische Konzerthaus im Sinne eines Gebäudes, welches ausschließlich für Musikveranstaltungen verwendet wird, scheint ausgedient zu haben und wird heutzutage mit einer Vielzahl an Funktionen angereichert.

1.10 Zusammenfassung

Die Entwicklung von Aufführungsstätten geht auch in Europa in Richtung des Mehrzweckbaus, wo oft bestehende Gebäude neben kulturellen Aufgaben – im Sinne eines möglichst flexiblen architektonischen Rahmens für alle Arten von Aufführungen – auch für kommunale Zwecke (z.B. als Vereinsraum oder Proberaum) umfunktioniert werden sollen. Hier prallen noch immer wirtschaftliche Interessen auf ästhetische und raumakustische Vorstellungen und führen zu unbefriedigenden Ergebnissen. Heutzutage sind Großstädte wie Wien oder Berlin, in denen schon eine Vielzahl an ausgezeichneten Aufführungsstätten vorhanden ist, einigermaßen gesättigt. Die renommierten Kulturbauten wurden in den letzten Jahren gegebenenfalls im Zuge von allfälligen Renovierungsarbeiten an moderne Anforderungen angepasst und um neue Räume erweitert wie z.B. der Wiener Musikverein um den Gläsernen Saal oder das Konzerthaus um den Berio-Saal. Somit bieten die großen Konzerthäuser neben den sehr genrespezifischen Hauptsälen auch den geeigneten Rahmen für zeitgemäße Darbietungen.

In Hinblick auf die zukünftige Entwicklung von Aufführungsstätten ist die Peripherie der Großstädte wesentlich interessanter, wo kleinere Gemeinden vor allem von einem mehrfachgenutzten Raum profitieren können, der nicht nur auf kulturelle Aufführungen beschränkt ist, sondern auch für andere gemeinnützige Tätigkeiten verwendet werden kann. Dieser neue Mehrzweckbautyp unterscheidet sich von der nordamerikanischen Variante einerseits durch seine Größenordnung, denn das Einzugsgebiet dieser Bauten ist wesentlich kleiner. Andererseits macht dieser Bautyp nicht denselben Fehler, indem er versucht, Konzerthaus, Theater und Opernhaus in einem Gebäude zu vereinen, sondern passt sich an die kommunalen Bedürfnisse vorort an und ergänzt somit das bestehende kulturelle Angebot der Großstadt. Der Mehrzweckbau im peripheren Stadtraum wird klanglich nie an die großen Konzerthäuser heranreichen, aber darin liegt auch nicht seine Existenzberechtigung. Außerdem müssen beim heutigen Stand der Technik keine allzu großen klanglichen Einbußen in Kauf genommen werden, um einen akustisch passablen Raum für unterschiedliche Zwecke zu entwerfen.

Eine Koexistenz zwischen den modernen, vielseitig einsetzbaren Mehrzweckbauten und den alten, spezialisierten Konzerthäusern ist in Zukunft anzustreben. An dieser Stelle setzt der Entwurf in Wiener Neudorf an, denn was aus den angeführten Beispielen der Entwicklung des Konzertsaalbaus mitgenommen werden kann, ist eine dringende Sensibilisierung für die Wechselbeziehung zwischen Architektur und Akustik, die Frage, ob und wie sich diese beiden Faktoren beeinflussen. Wie bisher zu lesen war, sind zahlreiche Varianten möglich, die zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können, und die Tendenz geht heutzutage zu einer Trennung von Architektur und Akustik, was den Entwurfsprozess vereinfacht und mit den vorhandenen Technologien problemlos durchführbar ist. Dennoch sollte man sich gerade bei der Planung von Aufführungsstätten die Möglichkeiten offen halten, je nach Projektvorgabe diese Wechselbeziehung neu zu definieren. Eine behutsame Adaptierung der weiteren Anforderungen (Raumprogramm etc.) kann dann im nächsten Schritt erfolgen.

2 Raumakustik – Theorie und Praxis

Für den Entwurf des Kulturzentrums mit zwei Mehrzwecksälen, von denen ein Saal vornehmlich für Musik und der andere für Sprache optimiert werden soll, sind Grundkenntnisse in der Raumakustik zu empfehlen. Dieses Kapitel bezieht sich größtenteils auf das Buch „Schallschutz und Raumakustik in der Praxis“ (2003) von Wolfgang Fasold und soll einen wesentlichen Überblick über die Grundsätze und Begriffe dieser Wissenschaft schaffen. Weiters werden konstruktiven Maßnahmen beschrieben, die zur raumakustischen Planung eines Auditoriums zur Anwendung kommen. Für eine genauere Betrachtung dieses Themas empfiehlt es sich, bei diesem Standardwerk zu beginnen.

2.1 Raumakustische Grundsätze und Begriffe

2.1.1 Physikalische Grundlagen und Definitionen

2.1.1.1 Schallschwingungen und Schallgeschwindigkeit

Mechanischen Schwingungen von elastischen Medien wie Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern werden als **Schall** bezeichnet. Im Bereich der Raumakustik sind vor allem die Schallausbreitung in der Luft und in weiterer Folge sogenannter Körperschall – also Übertragungen zwischen sich berührenden Bauteilen – relevant. Durch die elastische Verkopplung der Teilchen entsteht bei äußerer Krafteinwirkung eine Verdichtung und Verdünnung des Mediums, was in Folge eine Schallwelle auslöst. Die Geschwindigkeit, mit der diese Bewegung übertragen wird, wird **Schallgeschwindigkeit** genannt und beträgt bei Luft mit einer Temperatur von 20 °C 343 Meter pro Sekunde. Bei **Hörschall** befinden sich die **Frequenz** (Tonhöhe) und der **Druck** (Amplitude) im menschlichen Wahrnehmungsbereich. Diese beiden Größen bilden die wichtigsten Merkmale von Schallschwingungen.

2.1.1.2 Frequenz und Wellenlänge

Schallvorgänge bestehen in der Natur immer aus verschiedenen Teilfrequenzen und Amplituden. Diese Mischung aus Tönen wird als **Geräusch** definiert. Der reine **Ton**, ein Schallvorgang einer einzelnen Sinusbewegung, kommt in der Natur praktisch nie vor. Die **Frequenz** (in Hertz: 1 Hz = 1/s) ist die Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit. Der für den Menschen hörbare Frequenzbereich liegt etwa zwischen 16 Hz und 20.000 Hz (20 kHz). Dieser Bereich nimmt mit dem Alter vor allem in den Höhen ab.

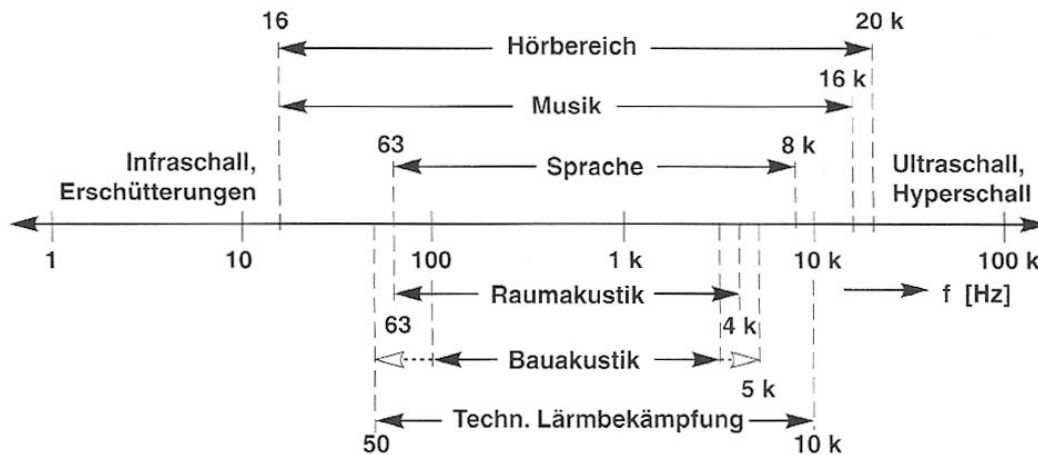


Abb. 14: Wichtige Frequenzbereiche der Akustik
(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 16)

Der Hörbereich wird in der Akustik wie in der Musik in Frequenzintervalle unterteilt. Die **Oktave** entspricht der Verdoppelung bzw. Halbierung der Frequenz. Die **Terz** entspricht einer Drittel-Oktave. In der westlichen Musik wird die Oktave weiters in 12 **Halbtöne** unterteilt. Ein Halbton besteht aus 100 Cent, eine Oktave umfasst somit 1.200 Cent. Die **Wellenlänge** λ (in Meter) ist der Abstand zwischen zwei Punkten mit gleichem Schwingungszustand (z. B. im Maximum oder im Minimum) einer sich ausbreitenden Welle:

$$\lambda = c/f \text{ [m]} \quad (1)^{14}$$

c ...Schallgeschwindigkeit = 343 m/s

f ...Frequenz [Hz]

Die Wellenlänge bei 100 Hz beträgt somit im Medium Luft 3,4 m, bei 1.000 Hz 34 cm und bei 10 kHz 34 mm. Viele raumakustische Effekte wie Absorptionen oder Reflexionen entstehen durch das Verhältnis von Wellenlängen bei bestimmten Frequenzen zur Raumgeometrie, Oberflächenbeschaffenheit oder zum Raumvolumen, deswegen variieren die baulichen Maßnahmen zur Änderung der Raumakustik auch je nach dem zu beeinflussenden Frequenzbereich.

2.1.1.3 Schalldruck und Schalldruckpegel

Der **Schalldruck** p (in Pascal) stellt die Amplitude von Schallschwingungen dar und befindet sich im Vergleich zum statischen atmosphärischen Ruhedruck von 100 kPa in einem sehr kleinen Wechseldruckbereich von 20 μ Pa (Hörschwelle) und 20 Pa (Schmerzgrenze). Der Wahrnehmungsbereich des Schalldruckes ist frequenzabhängig. Das heißt, dass tieferfrequente Schallschwingungen höheren Schalldruck benötigen, um wahrge-

¹⁴ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 17

nommen zu werden. In der Akustik wird zur leichteren Bemessung von Schalldrücken mit der Kenngröße des **Schalldruckpegels** L_p (in Dezibel) gearbeitet. Sie leitet sich logarithmisch aus dem Schalldruck ab und ist besser an die menschliche Wahrnehmung von Schallschwingungen angepasst.

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} [\text{dB}] \quad (2)^{15}$$

p_0 ...Bezugswert des Schalldruckes; $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ (Hörschwelle)

Die Einheit des Schalldruckpegels L_p ist **1 Dezibel (dB)**. Der geringste wahrnehmbare Schalldruckpegel liegt bei 0 dB und bildet die Hörschwelle. Die Schmerzgrenze liegt bei etwa 130 dB, Gehörschäden können bei kurzfristiger Einwirkung schon ab 120 dB entstehen. Änderungen des Schalldruckpegels von etwa 1 dB werden gerade noch wahrgenommen.

2.1.2 Schallquellen

2.1.2.1 Schalleistung, Schallleistungspegel und Schallabstrahlung

Da der Schalldruckpegel ortsabhängig und mit fortschreitender Entfernung von der Schallquelle schwächer wird, ist er zur korrekten akustischen Beschreibung einer Schallquelle nur in Verbindung mit einer Ortsangabe geeignet. Heutzutage werden Schallquellen eher durch die **Schalleistung** W (in Watt) oder durch den logarithmisch hergeleiteten **Schallleistungspegel** L_W (in Dezibel) gekennzeichnet:

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0} [\text{dB}] \quad (3)^{16}$$

W ...Schalleistung [W]

W_0 ...Bezugswert der Schalleistung: $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$

¹⁵ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 21

¹⁶ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 23

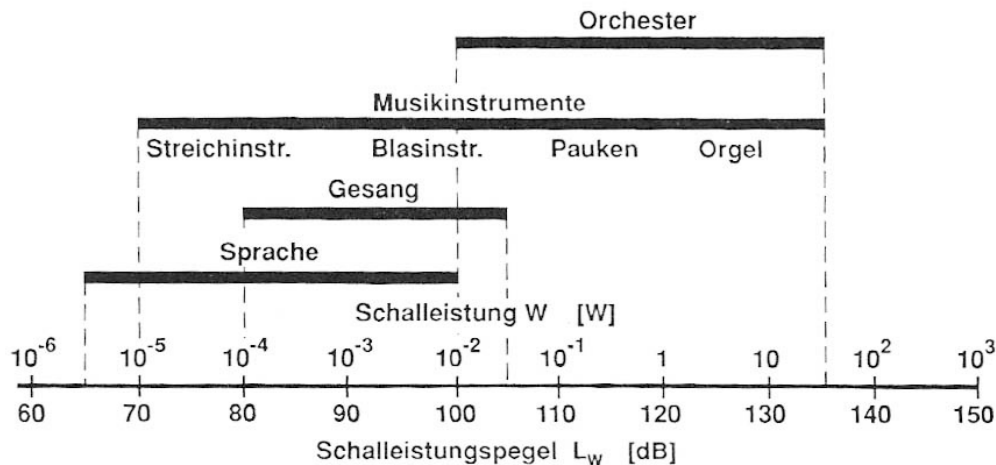


Abb. 15: Schalleistungs- und Schalleistungspegelbereich von Sprache, Gesang und Musik (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 24)

Abb. 15 zeigt die Schalleistungspegel für Sprache, Gesang und verschiedene Musikinstrumente. Die Geräusche des Publikums (Bewegen, Husten, Rascheln) in einem Konzertsaal betragen etwa 20 bis 40 dB. Eine normale Unterhaltung hat einen Schalleistungspegel von 70 dB, ein Schreien erreicht bis zu 100 dB. Zum Vergleich liegt der Schalleistungspegel eines Presslufthammers bei 120 dB, ein PKW erzeugt zwischen 60 und 80 dB, ein Fernseher bei Zimmerlautstärke etwa 60 dB. Eine Musikpassage in pianissimo liegt bei etwa 60 dB, während eine Passage eines lauten Orchesters mit Bläsern und Perkussion in fortissimo bis zu 135 dB erreichen kann, eine Lautstärke, bei der bereits ein Klingeln in den Ohren zu hören ist. Somit entsteht für die übliche Musikaufführung ein Schalleistungspegelbereich von etwa 60 dB.

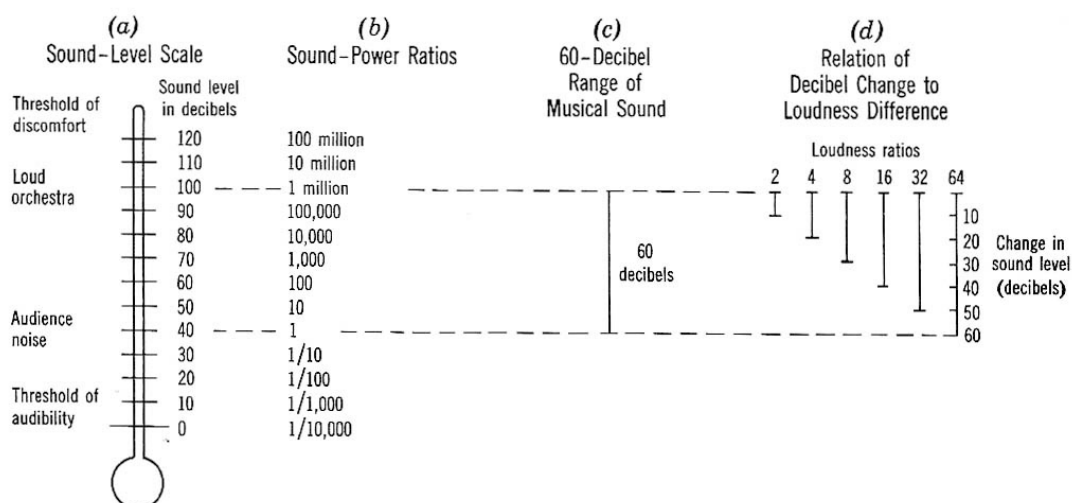


Abb. 16: Die Dezibel-Skala (BERANEK, *Music, acoustics & architecture*, 1962, S. 25)

2.1.2.2 Frequenz- und Zeitverläufe von Sprache und Musik

Grundsätzlich ist bei der **Sprache** festzuhalten, dass die männliche Stimme im Grundton etwa eine Oktave tiefer als die weibliche Stimme liegt. Im Gegensatz dazu liegen bei beiden Geschlechtern die mittleren Schalldruckpegel und Frequenzbereiche von Vokalen, stimmhaften und stimmlosen Konsonanten ungefähr im selben Bereich (siehe Abb. 17). Die Grundtöne sind für die Sprachverständlichkeit irrelevant, weswegen bei der akustischen Planung von Räumen, die vor allem für Sprache oder Gesang wie z. B. Vortragsräume oder Gesangszimmer verwendet werden sollen, die Frequenzen unter 200 Hz außer Acht gelassen werden können. Generell können sich die akustischen Maßnahmen, welche die Sprachverständlichkeit betreffen, auf den Bereich zwischen 125 bis 2000 Hz beschränken.

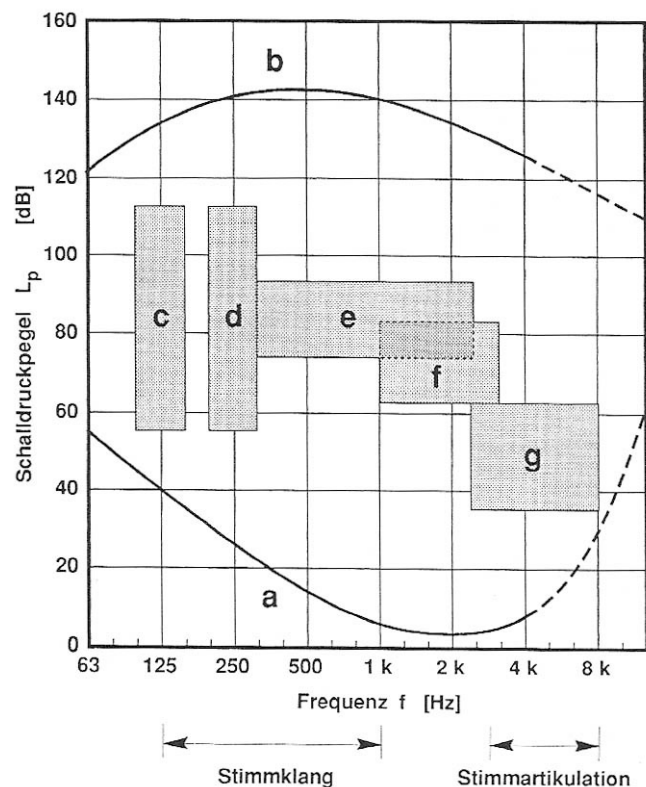


Abb. 17: Lage der Grundtonbereiche (c und d) und der Formantengebiete (e bis g) in der Hörfläche (a bis b):
a...Hörschwelle, b...Schmerzgrenze, c...männliche Grundtonhöhe, d...weibliche Grundtonhöhe, e...Vokale,
f...stimmhafte Konsonanten, g...stimmlose Konsonanten
(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 27)

In der **Musik** nehmen die verschiedenen Instrumentengruppen einen Frequenzbereich von etwa 16 bis 16.000 Hz ein, wobei die Orgel als einziges Soloinstrument das gesamte Spektrum umfassen kann. Abb. 18 zeigt in *schwarzen durchgehenden Balken* den Bereich der **Grundtöne**, die ein Instrument erzeugt, und in *verlängerten Linien* den Bereich der **Obertöne**, die durch die Grundtöne mitschwingen. Obertöne sind ganzzahlige Vielfache des Grundtons und erzeugen mit dem Grundton den harmonischen Grundklang

eines Instrumentes. Die *grau strichlierten Balken* stellen den Bereich der unharmonischen, hochfrequenten **Geräuschanteile** dar. Die Mischung dieser drei Klangkomponenten erzeugt die typische Klangcharakteristik (Timbre), die ein Instrument von einem anderen unterscheidbar macht. Die Geräuschanteile entstehen in erster Linie beim Ein- und Ausschwingen der gespielten Noten und sind gerade bei Perkussionsinstrumenten wie Pauke oder Trommel im Zusammenwirken mit den Obertönen für die Klangcharakteristik wesentlich, da es bei diesen Instrumenten meist an einem starken Grundton mangelt.

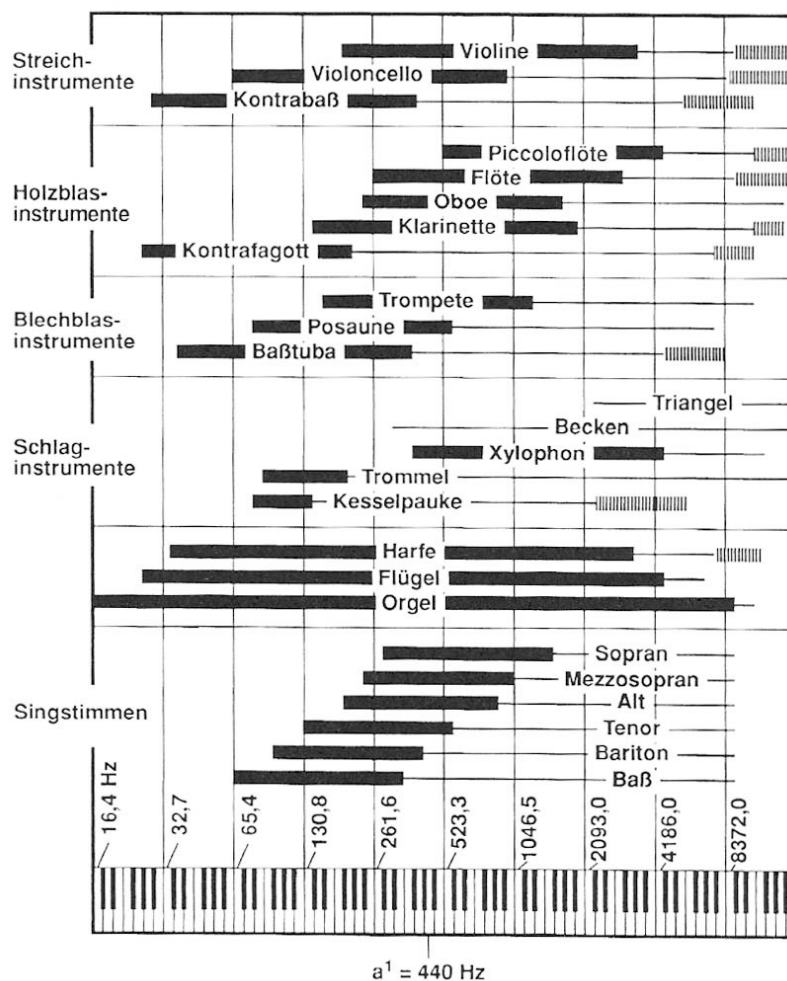


Abb. 18: Frequenzbereiche von Musikinstrumenten und Singstimmen (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 28)

Schalldruckpegel, Frequenz und Zeit als Hauptmerkmale von musikalischen Tongemischen lassen sich in Abb. 19 gut darstellen:

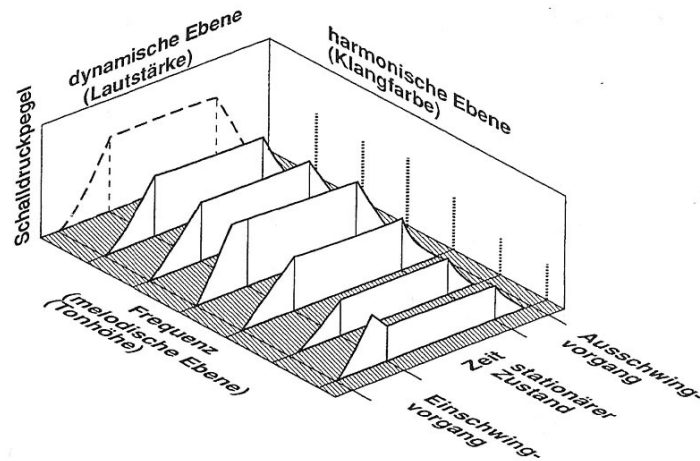


Abb. 19: Dreidimensionale Darstellung eines Tongemisches
(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 29)

2.1.2.3 Richtcharakteristik

Die Richtcharakteristik beschreibt die Ausrichtung und winkelabhängige Absenkung des Schalldrucks einer bestimmten Schallquelle auf einer Ebene bei verschiedenen Frequenzen.

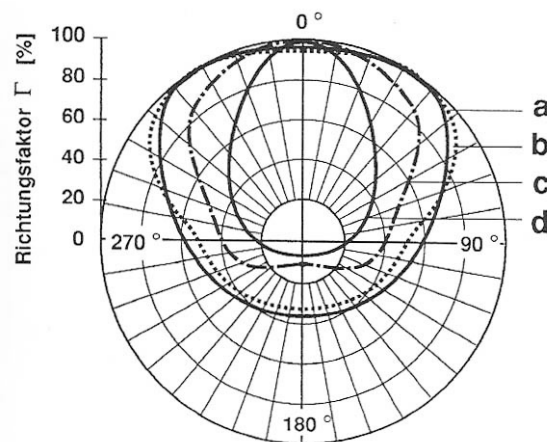


Abb. 20: Richtungsfaktor Γ für Sprache in der horizontalen Ebene bei verschiedenen Frequenzen: a) 420 Hz, b) 1100 Hz, c) 3400 Hz, d) 9200 Hz
(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 29)

In der **Sprache** sind z. B. die tieferen Frequenzen in der *horizontalen Ebene* weniger gerichtet als die höheren, was ein typisches Merkmal von gerichteten Schallquellen ist (siehe Abb. 20). Man hört eine Person noch immer dumpf, auch wenn sie einem den Rücken zukehrt. Tieffrequenter Schall beugt sich aufgrund der längeren Wellenlänge leichter um seine Schallquelle und wird auch nach hinten ausgestrahlt. In der *vertikalen Ebene* nimmt der Pegel in der unteren Hälfte des Kopfes ab, da der Oberkörper den Schall schluckt.

Auch bei **Orchesterinstrumenten** wie z. B. der Violine oder den Blasinstrumenten ist eine ausgeprägte Richtwirkung in den hohen Frequenzen zu erkennen. Deswegen ist es nötig, den Bühnenbereich mit Reflexionsflächen zu umgeben, die für eine gute Schallmischung und verbessertes Hören der Musiker untereinander sorgen. Bei der regulären Sitzanordnung des Orchesters unterstützen rückwärts gerichtete Reflexionen besonders die Streicher und seitlich gerichtete besonders die Bläser. Deckenreflexionen streuen den Schall auf alle Musiker gleichermaßen. Ab einer Frequenz von 500 Hz¹⁷ ist ausschließlich mit einer gerichteten Schallabstrahlung zu rechnen, deswegen sollten die bühnennahen Reflektoren ab dieser Frequenzgrenze den Schall in alle Richtungen streuen. Ihr maximaler Abstand zu den Musikern sollte zwei bis drei Meter nicht überschreiten.

2.1.3 Schallempfindung und Schallwirkung – Lautstärke

2.1.3.1 Frequenzabhängigkeit – Tonhöhenempfindung

Der **Lautstärkepegel** L_N (in phon) hängt stark von der subjektiven Wahrnehmung ab. Die **frequenzabhängige Empfindlichkeit des Gehörs** zeigt sich vor allem bei niedrigen Schalldruckpegeln und bei tiefen Frequenzen, wo die Kurven der Lautstärkepegel besonders markant ausfallen (siehe Abb. 21). Um einen Lautstärkepegel von 20 phon bei 50 Hz zu erreichen, muss z.B. der Schalldruckpegel 40 dB höher als bei 1.000 Hz sein. Bei 110 phon ist der Unterschied nur noch 10 dB groß. Das kleine Tal bei 4.000 Hz in allen Kurven zeigt, dass hier das Gehör am empfindlichsten ist. Um den eher ungenauen Begriff der Lautstärke in der Akustik besser zu erfassen, wie es z. B. beim Lautstärkevergleich von zwei Schallquellen nötig ist, wurde als Bezugswert die **Lautheit** N (in sone) definiert. 40 phon entspricht 1 sone. Steigt die Lautheit um 1 sone, verdoppelt sich stets die Lautstärkeempfindung.

¹⁷ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 31

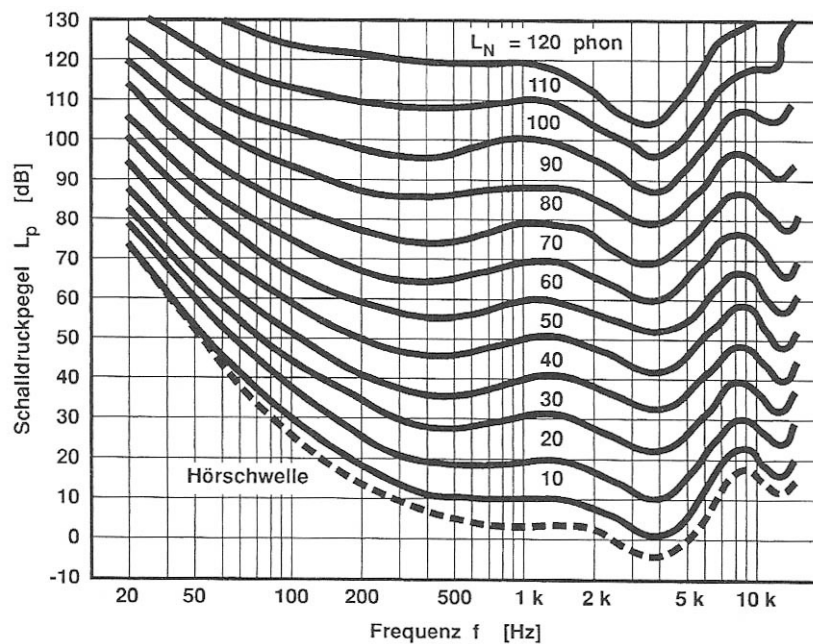


Abb. 21: Kurven gleicher Lautstärkepegel L_N für Sinustöne im freien Schallfeld (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 47)

Lautstärke darf nicht mit dem Schalldruckpegel L_p verwechselt werden. Die Lautstärke wird subjektiv wahrgenommen, während der Schalldruckpegel ein energetisches Maß ist. Zwei idente Glocken, die zur selben Zeit läuten, sind nicht automatisch doppelt so laut. Die Relation zwischen Schalldruckpegel und Lautstärke ist folgende: Bei 10 dB Pegelzunahme verdoppelt sich die empfundene Lautstärke, bei 20 dB Pegelzunahme vervierfacht sie sich.

2.1.3.2 Kurzzeiteinwirkungen – Impulse und Reflexionen

Das Gehör reagiert generell träge auf Schalleindrücke. Das heißt, der tatsächliche Schalldruckpegel eines Signals stellt sich erst nach einer durchschnittlichen **Einschwingphase von 35 ms** ein¹⁸. Für die Wahrnehmung von Sprache und Musik sind außerdem das **Ausschwingverhalten** und die Reaktion auf kurz **aufeinander folgende Schallsignale** relevant. Im Gehör klingt der Lautstärkepegel des impulsgebenden Signals nach dessen Beendigung mit etwa 9 phon pro 50 ms ab, was ungefähr einer Nachhallzeit von 0,35 s entspricht. Geräusche, die kurzzeitig dem ersten Impuls folgen und dabei unter dem Ausgangsschalldruckpegel sowie innerhalb dieser Dauer liegen, werden vom Ausschwingen verdeckt und nicht wahrgenommen. Diese Verdeckungserscheinungen treten vor allem in Räumen mit langen Nachhallzeiten auf, wo die Ausschwingphase noch zusätzlich verlängert wird.

¹⁸ Vgl. FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 52

Ab einer gewissen Zeitverzögerung zwischen zwei ähnlichen Geräuschen, z. B. zwischen dem Direktschall und einer Reflexion, wird diese deutlich wahrgenommen. Die **Verwischungsschwelle** ist eine wichtige Grenze für die **Laufzeitdifferenz** zwischen Direktschall und Reflexionen. Sie ist bei der Sprache für die Verständlichkeit relevant und vom Verhältnis der Schalldruckpegel von Ausgangs- und Folgegeräusch, von der Nachhallzeit des betreffenden Raumes und von der Sprachgeschwindigkeit abhängig. Als Grenze zwischen nützlichen und störenden Reflexionen liegt der Mittelwert für **Sprache bei 50 ms**.

In der **Musik** gibt die Verwischungsschwelle nicht den Zeitpunkt an, ab dem Reflexionen als störend empfunden werden, sondern sie definiert die Grenze zwischen Reflexionen, die für Klarheit und Klangdefinition der Musik nützlich sind, und jenen, die vor allem die Räumlichkeit der Musik unterstützen. Sie liegt hier **bei 80 ms**. Durch **seitliche Reflexionen** mit einer Zeitverzögerung **ab 25 ms** wird die räumliche Wahrnehmung schon bei 10 dB weniger Schalldruckpegel als bei frontaler Beschallung erhöht, was die physikalische Erklärung ist, weshalb Konzertsäle in Schuhschachtelform mit schmalen, nahen Seitenwänden sehr gut und räumlich klingen (siehe auch Abb. 36). Die zeitliche Verzögerung zwischen Direktschall und der ersten am Sitzplatz eintreffenden Reflexion wird **Anfangszeit t_i** (Initial Time) bzw. **Anfangszeitlücke** (ITDG: Initial Time Delay Gap) genannt. Sie zählt zu den wichtigsten Faktoren, die bei der raumakustischen Planung eines Konzertsaals berücksichtigt werden müssen.

Vergrößert sich nun die Verzögerung zwischen Direktschall und Reflexionen, entsteht ein störendes **Echo**, also ein Schalleindruck, der getrennt vom Ausgangssignal wahrgenommen wird. Bei der Sprache liegt die **Echogrenze bei etwa 100 ms**¹⁹. Eine Reflexion wird dann als störend empfunden, wenn die Pegeldifferenz zum Direktsignal nach 100 ms noch mindestens 15 dB beträgt, nach 200 ms noch 20 dB und nach 300 ms noch 30 dB. Echos entstehen vor allem bei hohen und glatten Raumbegrenzungsflächen oder bei konkaven Wänden, wo der Schall direkt reflektiert und ungünstig gebündelt wird. Potenzielle Brennpunkte bilden sich am häufigsten in den vorderen Sitzreihen. Für die raumakustische Planung von Räumen spielt vor allem die zur Laufzeitdifferenz äquivalente **Laufwegdifferenz** eine wichtige Rolle. Eine Verwischungsschwelle von 50 ms entspricht bei einer Schallgeschwindigkeit von 340 m/s einer Wegdifferenz von 17 m, was also die Grenze für störende Reflexionen in der Sprache darstellt. Die Echogrenze mit 100 ms ergibt eine Wegdifferenz von 34 m.

¹⁹ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 53

2.1.4 Schallausbreitung in Räumen – Schallabsorption und Schallreflexion

Im Gegensatz zum Freien, wo der Schalldruckpegel mit der Entfernung abnimmt, verändert er sich innerhalb eines Raumes ab einem gewissen Abstand von der Schallquelle nicht und ist nahezu ortsunabhängig. Aufgrund der Begrenzungsflächen wird der Schall mehrfach hin- und hergeworfen und bildet eine **diffuses Schallfeld**, das sich mit dem Direktschall überlagert und mit der Entfernung von der Quelle überwiegt. Der Wert des Schalldruckpegels im diffusen Schallfeld ist von den Absorptions- bzw. Reflexionseigenschaften der Begrenzungsflächen abhängig.

2.1.4.1 Schallabsorptionsgrad und äquivalente Schallabsorptionsfläche

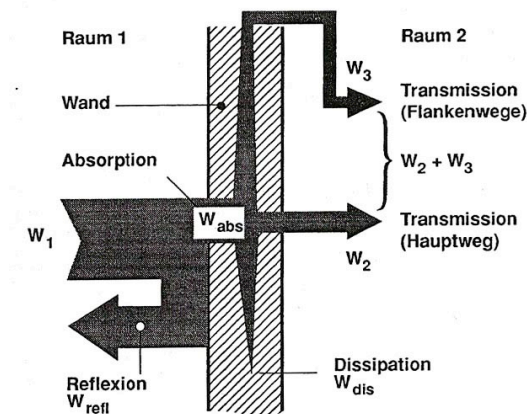


Abb. 22: Prinzipdarstellung zu Absorption, Reflexion und Transmission bei Schalleinfall auf eine Wand (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 65)

Wenn Schall mit einer Schallleistung von W_1 auf eine Wandfläche in Raum 1 trifft, wird der größte Teil davon als W_{refl} reflektiert (siehe Abb. 22). Der **Schallreflexionsgrad** ρ stellt diesen Vorgang dar:

$$\rho = W_{refl} / W_1 \quad (4)^{20}$$

Analog dazu berechnet sich der Absorptionsvorgang mit dem **Schallabsorptionsgrad** α :

$$\alpha = W_{abs} / W_1 \quad (5)^{21}$$

Bei einer vollständigen Absorption ist $\rho = 0$ und $\alpha = 1$, woraus sich folgende Formel ableitet:

$$\rho + \alpha = 1 \quad (6)^{22}$$

²⁰ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 66

²¹ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 66

²² FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 66

Bei der Absorption wird ein Teil der Schallleistung W_{diss} im Bauteil zu Wärme umgewandelt, was sich **Dissipation** nennt. Ein weiterer Teil wird in den nächsten Raum (Raum 2) oder ins Freie übertragen, was direkt über die Wand W_2 oder über die flankierenden Bauteile W_3 geschehen kann, und wird mit dem **Schalltransmissionsgrad** τ beschrieben:

$$\tau = W_2 / W_1 \text{ bzw. } \tau' = W_2 + W_3 / W_1 \quad (7)^{23}$$

In der Praxis ergibt sich bei der Schalldämmung von Bauteilen folgende Formel für den Schallabsorptionsgrad einer Fläche:

$$\alpha = W_{\text{abs}} / W_1 = W_{\text{diss}} + W_2 + W_3 / W_1 = (W_{\text{diss}} / W_1) + \tau' \quad (8)^{24}$$

Es ist üblich, für Schallabsorber den **frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrad** α für Terz- oder Oktavband-Mittenfrequenzen von 125 bis 2.000 Hz anzugeben. Das Produkt aus Schallabsorptionsgrad eines Bauteiles und dessen Fläche S (in Quadratmeter) ergibt die **äquivalente Schallabsorptionsfläche** A , welche nicht nur zur Kennzeichnung der Absorptionswirkung von flächigen Bauteilen, sondern auch von Gegenständen, Personen und Räumen verwendet wird:

$$A = \alpha * S [\text{m}^2] \quad (9)^{25}$$

2.1.4.2 Technische Schallabsorber

Die zwei häufigsten technischen Absorber sind **poröse Schallabsorber** (mineralische oder organische Faserstoffe, textile Vorhänge etc.) und **Resonatoren** (Plattenschwinger, Lochplattenschwinger, Helmholtzresonatoren), wobei sich deren Frequenzverläufe unterscheiden und sie sich somit für unterschiedliche Zwecke eignen. Während poröse Absorber vor allem bei mittleren und hohen Frequenzen zur Anwendung kommen und breitbandig wirken, arbeiten Resonatoren nur sehr schmalbandig in den tiefen und mittleren Frequenzen (siehe Abb. 23).

²³ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 66

²⁴ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 66

²⁵ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 68

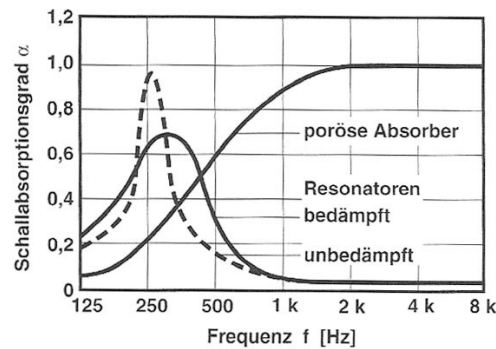


Abb. 23: Frequenzverlauf des Schallabsorptionsgrades α von porösen Absorbern und von Resonatoren (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 70)

Mit beiden Absorberarten ließe sich das komplette Frequenzspektrum abdecken, was aber in der raumakustischen Planung nicht vonnöten ist, da hier in der Regel lediglich die im hohen Frequenzbereich wirksamen Publikumsabsorptionen mithilfe von Tiefenabsorbern ergänzt werden müssen.

2.1.4.2.1 Poröse Schallabsorber

Bei der porösen Schallabsorption wird die Schallenergie in Wärmeenergie umgewandelt, indem die Luftteilchen die Poren im Inneren in gegenseitige Reibung versetzen. Die Poren müssen offen und so tief und eng sein, dass Schallenergie in den Absorber eindringen und dieser Reibungsvorgang erfolgen kann. Gängige poröse Schallabsorber sind Mineral-, Stein- bzw. Glaswolle in unterschiedlichen Rohdichten, Baumwolle, PC-Faser, Holzwolle-Leichtbauplatten, Bimsbeton und Schaumkunststoffe.

2.1.4.2.2 Plattenschwinger und Lochplattenschwinger

Plattenschwinger bestehen aus dünnen Platten aus Gipskarton, Sperrholz, Span oder Holzfasern, die als **Masse** wirken und mit einem Abstand vor der Wand- oder Deckenfläche aufgebracht werden. Der Luftzwischenraum wirkt als **Feder**. Bei der Resonanzfrequenz dieses Masse-Feder-Systems wird dem Schallfeld die größte Energie entzogen, die dann in Bewegungsenergie umgewandelt wird und für eine hohe Schallabsorption sorgt. In der Regel wird der Zwischenraum mit losem, offenporigem Dämmstoff ausgefüllt, um die Absorption zu erhöhen und den Resonanzbereich zu erweitern.

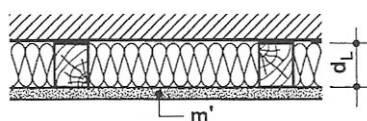


Abb. 24: Prinzipdarstellung eines Plattenschwingers: d ...Wandabstand, m' ...flächenbezogene Masse (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 83)

2.1.4.2.3 Helmholtzresonatoren

Helmholtzresonatoren sind Resonanzabsorber für tiefe Frequenzen, die vor allem in vorhandenen Hohlräumen wie Wand- und Deckensimsen, unter Treppenstufen, im Inneren von Stützen oder in der Bestuhlung zur Anwendung kommen. Sie wirken ähnlich wie Lochplattenschwinger und bestehen aus einem Resonatorhals als Masse und einem Resonatorvolumen als Feder. Um den Resonator optimal an das Schallfeld zu koppeln und ihm möglichst viel Energie zu entziehen, wird der Hohlraum mit einem Dämmstoff ausgefüllt.

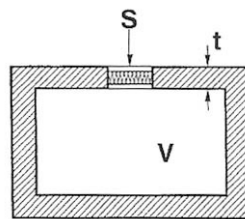


Abb. 25: Prinzipdarstellung eines Helmholtzresonators: S...Resonatorhalsquerschnittfläche, t...Resonatorhalslänge, V...Resonatorvolumen
(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 88)

2.1.4.3 Unvermeidbare Schallabsorptionen in Räumen

Auch wenn in einem Raum keine technischen Schallabsorber installiert sind, so gibt es unvermeidbare Schallabsorptionsflächen wie Publikum, Raumbegrenzungsflächen und Luft. Gerade im Saalbau sind diese Faktoren für die Raumakustik ausschlaggebend und müssen in den Berechnungen berücksichtigt werden.

2.1.4.3.1 Schallabsorptionen durch Publikum und Bestuhlung

Der Publikumsbereich stellt generell die größte schallabsorbierende Oberfläche im Auditorium dar, wobei für den Grad der Absorption nicht die Zuschaueranzahl, sondern die von den Sitzplätzen eingenommene Fläche relevant ist. So finden z. B. im Bayreuther Festspielhaus 530 Personen, in der Boston Symphony Hall 440 Personen und in der Wiener Staatsoper 380 Personen auf etwa 230 m² Platz, und dennoch haben alle Säle ein ähnliches Absorptionsverhalten²⁶.

Der Publikumsbereich weist aufgrund der Vielfältigkeit von **Kleidung** als porösem Schallabsorber eine große Streubreite der Schallabsorption auf. Die äquivalente Schallabsorptionsfläche eines stehenden Menschen kann aufgrund der Bekleidung bei 1.000 Hz

²⁶ Vgl. BERANEK, *Music, Acoustics and Architecture*, 1962, S. 399

zwischen $0,4 \text{ m}^2$ (luftiges Kleid) und $1,4 \text{ m}^2$ (schwerer Mantel) liegen²⁷, deswegen ist bei der raumakustischen Planung nur die Annahme von Mittelwerten sinnvoll. Für die Berechnung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche von Publikumsflächen wird der Schallabsorptionsgrad von dieser Fläche herangezogen. Der Schallabsorptionsgrad vom Publikumsbereich hängt von der **Art der Bestuhlung** ab. Bei gepolsterten Stühlen ist er größer als bei Holzstühlen. Abb. 26 zeigt für das vollbesetzte und das unbesetzte Auditorium Mittelwerte, mit denen sich die äquivalente Schallabsorptionsfläche berechnen lässt.

Publikums- und Gestühlfläche	Oktavband-Mittenfrequenz f_m [Hz]					
	125	250	500	1 k	2 k	4 k
	Schallabsorptionsgrad α					
Publikum auf Holzgestühl	0,40	0,60	0,75	0,80	0,85	0,80
Publikum auf Polstergestühl	0,60	0,75	0,80	0,85	0,90	0,85
Holzgestühl unbesetzt	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,15
Polstergestühl unbesetzt	0,30	0,55	0,55	0,65	0,75	0,75
Personen	äquivalente Schallabsorptionsfläche A je Person [m^2]					
> 2 m^2 je Person (Musiker)	0,35	0,65	0,85	1,00	1,10	1,10
ca. $0,65 \text{ m}^2$ je Person (Publikum)	0,25	0,45	0,60	0,65	0,75	0,75
< $0,5 \text{ m}^2$ je Person (Chor)	0,15	0,25	0,40	0,50	0,60	0,60

Abb. 26: Schallabsorption durch Publikum, Bestuhlung und Personen (Planungswerte)
(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 99)

Es wird von einem Reihenabstand von $0,9 \text{ m}$ und einer Stuhlbreite von $0,6 \text{ m}$ ausgegangen. Die Polsterbestuhlung ist stoffbezogen und mit einem schallabsorbierenden Material (z. B. offenporigem Schaumkunststoff) gefuttert. Die Sitzpolsterung beschränkt sich auf den Bereich, auf dem der Zuschauer auch tatsächlich sitzt, was gerade in Konzertsälen eingeplant werden sollte, da sich somit die Absorptionscharakteristik und die Nachhallzeit des Raumes im vollbesetzten und im unbesetzten Zustand beinahe gleichen. Die Musiker können sich während der Proben bereits auf die Raumakustik des später besetzten Saales einstellen.

Um die Schallabsorption des Besuchers selbst zu berechnen, wird die **frequenzabhängige äquivalente Schallabsorptionsfläche A pro Person** herangezogen, wobei es sich wegen der erwähnten unterschiedlichen Absorptionsfähigkeit von Kleidung um Mittelwerte handelt. Weiters ist die Besetzungsdichte relevant, sodass eine einzelne Person wie z. B.

²⁷ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 99

ein Redner oder Solist eine größere äquivalente Schallabsorptionsfläche pro Person aufweist als eine Person im Publikum oder Chor, wo man meist eng nebeneinander platziert ist. Generell haben moderne Säle, um bei den Nachhallzeiten den älteren Sälen zu entsprechen, meist ein größeres Raumvolumen, da die Sitzfläche, Rücken- und Armlehnen sowie Durchgänge und Fluchtwege heutzutage großzügiger dimensioniert sind. So ist bei jedem zusätzlichen Quadratmeter an Publikumsbereich mit etwa $1,1 \text{ m}^3$ (siehe Abb. 37) zusätzlichem Raumvolumen zu rechnen.

2.1.4.3.2 Schallabsorption durch Raumbegrenzungsflächen

Abb. 27 zeigt für gängige Raumbegrenzungsflächen die Schallabsorptionsgrade, die zwar relativ gering sind, aber aufgrund der meist großen Flächen in einem Raum nicht vernachlässigt werden dürfen.

Raumbegrenzungsfläche	Oktavband-Mittenfrequenz f_m [Hz]						
	63	125	250	500	1 k	2 k	4 k
	Schallabsorptionsgrad α						
Marmor, Fliesen, Klinker	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Beton, Stuckgips, Naturstein	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Kalkzementputz, Tapete, Gipskartonplatten	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08
Schaumstofftapete, etwa 8 mm dick	0,02	0,03	0,10	0,25	0,40	0,50	0,60
Dielen, Parkett, Spanplatten festaufliegend	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05
Dielen, Parkett, Holzboden hohl liegend (auf Leisten)	0,15	0,10	0,08	0,06	0,05	0,05	0,05
Linoleum, PVC-Belag, Gummibelag	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05
Linoleum, PVC-Belag auf Filzschicht	0,02	0,02	0,05	0,10	0,15	0,07	0,05
Spannteppich (PVC-Folie auf 5 mm Filz)	0,02	0,02	0,09	0,20	0,15	0,07	0,05
Teppichboden bis etwa 5 mm Dicke	0,02	0,03	0,04	0,06	0,20	0,30	0,40
Teppichboden bei mehr als etwa 5 mm Dicke	0,02	0,03	0,06	0,10	0,30	0,50	0,60
Fenster, Spiegel	0,20	0,12	0,10	0,05	0,04	0,02	0,02
Tür, Holz, lackiert	0,15	0,10	0,08	0,06	0,05	0,05	0,05
Bühnenöffnung	0,40	0,40	0,40	0,60	0,70	0,80	0,80

Abb. 27: Schallabsorptionsgrade α von Raumbegrenzungsflächen (Planungswerte)
(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 100)

Teppiche und Teppichböden sind gerade bei hohen Frequenzen wirksame poröse Schallabsorber. Um die Absorptionsfähigkeit auch in den unteren Frequenzen zu verbessern, können Filzschichten untergelegt werden. **Bodenbeläge** mit fester Oberschicht und weicher, elastischer Unterschicht wie z. B. Linoleum mit Gummibelag zeigen in den mittleren Frequenzen höhere Schallabsorptionsgrade, da sie als Masse-Feder-Systeme ähnlich wie Plattenschwinger wirken. Auch bei hohl liegenden **Holzböden** wie Parkett, Dielen, bei Podien oder bei massiven Wänden mit leichter Vorsatzschale ist jener Effekt in den tiefen Frequenzen auffällig. **Fenster** weisen gerade in den tiefen Frequenzen eine hohe Absorption auf, was auf die relativ geringe Masse der Glasscheiben in Bezug auf ihre Fläche zurückzuführen ist. Der Großteil des Schalls strömt somit nach außen oder in einen benachbarten Raum.

2.1.4.3.3 Schallabsorption durch Luft

Bei Luftschallausbreitungen über große Distanzen wie z. B. bei Freiluftbühnen oder sehr großen Hallen kommt es durch Reibungs-, Zähigkeits- und Wärmeleitungsverluste zu Schallabsorptionen im hohen Frequenzbereich.

2.1.4.4 Reflexionswirkung von Flächen

Der Ablauf einer Reflexion richtet sich nach dem Verhältnis von Schallwellenlänge λ zur **Strukturbreite** b (Längs- bzw. Querabmessung in m) der Reflexionsfläche. In Räumen mit vielen strukturierten Einbauten wie z. B. Galerien oder Balkonen entstehen deswegen frequenzabhängige Reflexionsabläufe.

Prinzipiell sind drei Formen von Reflexionen möglich (siehe Abb. 28):

- **Spiegelnde Reflexionen an der Struktur:** Ist die Wellenlänge λ kürzer als die Strukturbreite b , so gilt ähnlich wie in der Optik das Gesetz „Schalleinfallswinkel ist gleich Schallausfallswinkel“. Auftreffende und zurückgeworfene Schallstrahlen liegen dabei in einer Ebene. Spiegelnde Reflexionen treten oberhalb jener Frequenz auf, ab der die Abmessungen der Reflexionsfläche fünf Mal größer als die Wellenlänge ist. Bei einer reflektierenden Strukturbreite von 20 cm liegt der Wert hier bei 8.500 Hz, da diese Frequenz eine Wellenlänge von 4 cm hat.
- $(340 \text{ [m/s]} / 0,2 \text{ [m]}) * 5 = 8.500 \text{ [Hz]}$
- **Ungerichtete, diffuse Reflexionen** entstehen, wenn die Abmessungen der Reflexionsfläche und die Wellenlänge des auftreffenden Schalls etwa gleich groß sind. Bei einer Strukturbreite von 20 cm liegt der Wert bei 1.700 Hz.
- $340 \text{ [m/s]} / 0,2 \text{ [m]} = 1.700 \text{ [Hz]}$

- **Spiegelnde Reflexionen an der Grundfläche:** Wenn die Schallwellenlänge um ein Vielfaches größer (mindestens das Fünffache) als die Strukturabmessungen ist, wird die Struktur ignoriert und der Reflexionsvorgang von der Grundfläche festgelegt. Bei einer Strukturbreite von 20 cm liegt der Wert hier bei 340 Hz.
- $(340 \text{ [m/s]} / 0,2 \text{ [m]}) / 5 = 340 \text{ [Hz]}$

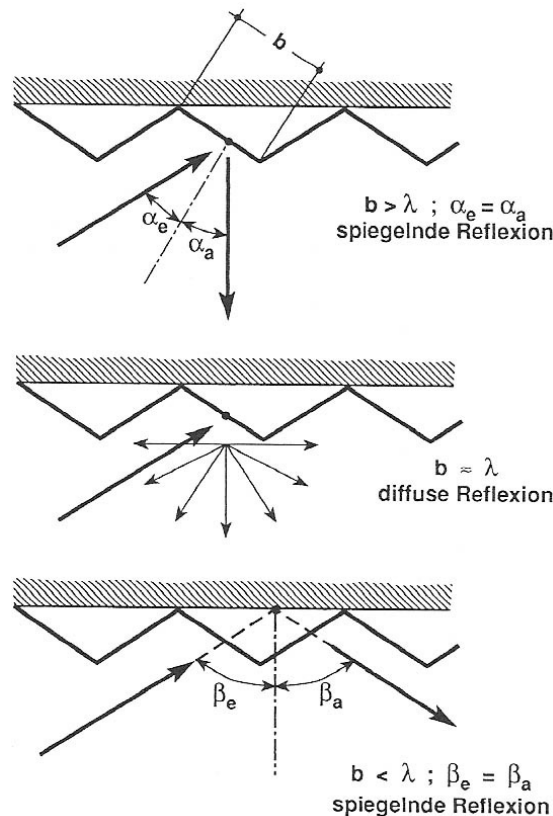


Abb. 28: Reflexionswirkungen einer Fläche mit Strukturen der Breite b in Abhängigkeit von Wellenlänge λ : α_e , β_e ...Schalleinfallswinkel, α_a , β_a ...Schallausfallswinkel
(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 104)

Ein Großteil der raumakustischen Planung besteht darin, durch gerichtete Reflexionen bestimmte Zonen im Publikumsbereich mit mehr Schall zu versorgen und durch diffuse Reflexionen späte Reflexionen (z. B. Echos) zu vermeiden. Dabei ist zu beachten, dass die Raumbegrenzungsflächen ausreichend schwer ausgeführt werden müssen, um Reflexionen überhaupt zu ermöglichen und nicht nur den Schall zu absorbieren. Je tiefer die zu reflektierende Frequenz ist, desto größer muss die flächenbezogene Masse sein. Für Reflexionen von **Sprache** reichen schon 10 kg/m^2 , bei **Musik** beträgt die flächenbezogene Masse etwa 40 kg/m^2 , wobei hier besonders schallnahe Reflexionen in Bühnennähe relevant sind²⁸.

²⁸ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 105

2.1.4.4.1 Geometrisch gerichtete Reflexionen

Die Reflexionsabläufe bei **geraden Flächen** können in einem Schallstrahlendiagramm mithilfe von **Spiegelschallquellen** gezeichnet werden (siehe Abb. 29). Spiegelschallquellen sind imaginäre Schallquellen, die auf einer lotrechten Linie $S-S'$ zur Reflexionsfläche auf derselben Entfernung dazu liegen. Bei mehreren, gleichzeitigen Spiegelungen, so wie sie in Ecken auftreten, werden die Spiegelschallquellen in Ordnungen (S' , S'' , ...) unterteilt.

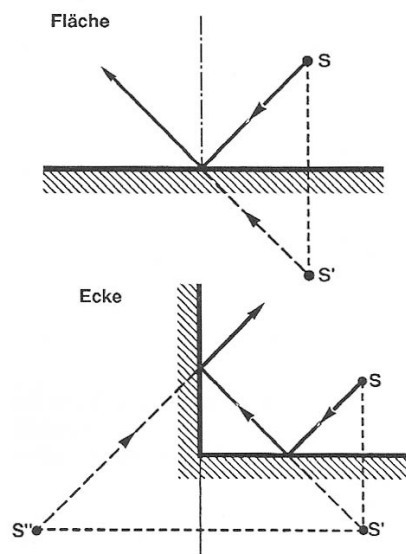


Abb. 29: Geometrisch gerichtete Reflexionen an einer Fläche und an einer Ecke: S ...Schallquelle, S' ...Spiegelschallquelle 1. Ordnung, S'' ...Spiegelschallquelle 2. Ordnung (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 106)

Bei **gekrümmten Flächen** befindet sich die Winkelhalbierende zwischen Einfalls- und Ausfallsrichtung des Strahles immer im Kreismittelpunkt M (siehe Abb. 30). Während **konvexe Flächen** den Schall streuen, bündeln **konkave Flächen** diesen und erzeugen störende Schallkonzentrationen, weswegen in der raumakustischen Planung besonders hier auf die Reflexionsabläufe geachtet werden muss. Je näher die Schallquelle dem Kreismittelpunkt ist, desto größer ist die Gefahr von störenden Schallkonzentrationen. Dies lässt sich lösen, indem die Schallquelle näher zur Reflexionsfläche verschoben wird. So werden die Schallkonzentrationen entweder in einen unkritischen Raumbereich oder gleich nach außerhalb gelenkt. Konkave Flächen können Schallstrahlen gezielt auf unterversorgte Bereiche (z. B. hinterer Publikumsbereich, unterhalb einer Balkonauskragung) lenken, während konvexe Flächen zur Vermeidung von Schallkonzentrationen verwendet werden.

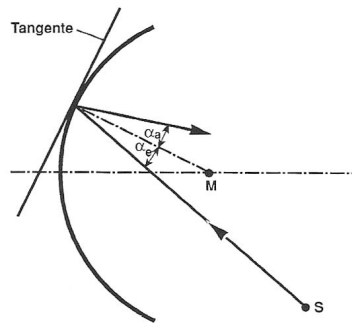


Abb. 30: Reflexionen an einer konvex gekrümmten Fläche ($\alpha_e = \alpha_a$): S...Schallsender, M...Kreismittelpunkt, α_e ...Schalleinfallswinkel, α_a ...Schallausfallswinkel
(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 107)

2.1.4.4.2 Diffuse Reflexionen

Der **Diffusitätsgrad** legt die Gleichmäßigkeit fest, mit der die Reflexionen in alle Raumrichtungen verteilt werden, wobei der Wert 1 die größtmögliche Verteilung definiert. Zusätzlich stellt der **Streugrad** das Verhältnis von gestreuter Energie zur Gesamtenergie dar. Die gestreute Energie setzt sich aus der Energie aller Reflexionsstrahlen zusammen, die mehr als $\pm 10^\circ$ von der Richtung der geometrisch gerichteten Reflexion abweichen. Wenn in die Richtung der spiegelnden Reflexion keine Energie zurückgeworfen wird, dann ist der Streugrad 1. Ist der Streu- oder der Diffusitätsgrad 0, dann entspricht das einer geometrisch gerichteten Reflexion. Die **Strukturen der Reflexionsoberflächen** sind üblicherweise rechteckig, dreieckig oder halbzylindrisch, um eine hohe Diffusität zu gewährleisten (siehe Abb. 31).

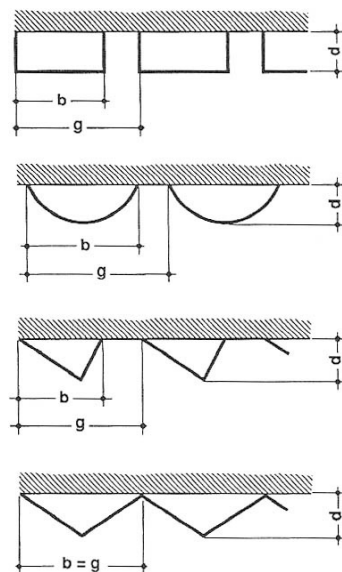


Abb. 31: Beispiele geometrischer Strukturen für diffuse Reflexionen: b...Strukturbreite, d...Strukturtiefe, g...Strukturperiode (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 112)

Die in der Praxis größtmögliche Diffusität von etwa 0,8 wird für eine bestimmte Frequenz dann erreicht, wenn die **Strukturperiode** g (in m) ein- bis zweimal so groß wie ihre Wellenlänge ist. Die **optimale Frequenz** f_{opt} ist folglich:

$$f_{\text{opt}} \approx 500 / g \text{ [Hz]} \quad (10)^{29}$$

Die **Strukturbreite** b sollte größer gleich der halben Strukturperiode ($b \geq g / 2$) gewählt werden. Bei dreieckigen und halbzyklindrischen Formen sollte für die größte Wirksamkeit die Strukturbreite der Strukturperiode ($b = g$) entsprechen. Die **Strukturtiefe** d berechnet sich wie folgt:

$$d \approx (0,3 \text{ bis } 0,5) * b \text{ [m]} \quad (11)^{30}$$

Die höchste Diffusität für eine auf **Sprache** optimierte Struktur muss im Frequenzbereich von 500 bis 1000 Hz erreicht werden. Daraus ergeben sich für die Strukturperiode 0,5 bis 1 m und je nach Strukturform eine Strukturtiefe von 0,1 bis 0,5 m.

2.1.5 Raumakustik und musikalische Qualitäten

Neben der bauphysikalischen Terminologie gibt es laut Beranek auch zahlreiche Begriffe, die von Akustikern, Musiktheoretikern und Künstlern gleichermaßen gebraucht werden, um spezielle Klangqualitäten zu beschreiben, die von der Raumakustik des Auditoriums abhängig sind. Der Vollständigkeit halber muss erwähnt werden, dass jene Qualitäten im folgenden Entwurf nicht bemessen werden können, da der nötige Aufwand zu groß wäre.

²⁹ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 112

³⁰ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 112

QUALITY		ANTITHESIS	
<i>Noun form</i>	<i>Adjectival form</i>	<i>Noun form</i>	<i>Adjectival form</i>
1 intimacy, presence	intimate	lack of intimacy lack of presence	non-intimate
2 liveness, fullness of tone reverberation	live reverberant	dryness deadness lack of reverberation	dry dead unreverberant
resonance	resonant	dryness	dry
3 warmth	warm	lack of bass	brittle
4 loudness of the direct sound	loud direct sound	faintness ... weakness ...	faint ... weak ...
5 loudness of the reverberant sound	loud ...	faintness ... weakness ...	faint ... weak ...
6 definition, clarity	clear	poor definition	muddy
7 brilliance	brilliant	dullness	dull
8 diffusion	diffuse	poor diffusion	non-diffuse
9 balance	balanced	imbalance	unbalanced
10 blend	blended	poor blend	unblended
11 ensemble	—	poor ensemble	—
12 response, attack	responsive	poor attack	unresponsive
13 texture	—	poor texture	—
14 no echo	echo-free anechoic	echo	with echo echoic
15 quiet	quiet	noise	noisy
16 dynamic range	—	narrow dynamic range	—
17 no distortion	undistorted	distortion	distorted
18 uniformity	uniform	non-uniformity	non-uniform

Abb. 32: Subjektive musikalische Qualitäten eines Konzertsaals
(BERANEK, *Music, acoustics & architecture*, 1962 S. 64)

2.1.5.1 Klangfülle

Die Klangfülle wird durch die Nachhallzeit, durch das Verhältnis der Lautstärken von Direktschall und Nachhall und durch das Verhältnis der Gesamtlautstärke zu den Hintergrundgeräuschen beeinflusst, wobei die Saalform die ersten beiden Faktoren wesentlich bestimmt. Der Nachhall erhöht die wahrgenommene Lautstärke und ändert den Charakter der Musik durch das Überblenden der gespielten Einzeltöne. Ungenauigkeiten in der Spieltechnik und Intonation des Solisten werden verschleiert und die Töne ähnlich wie bei einem „glissando“ verbunden, was die künstlerische Darbietung musikalischer macht. Komponisten und Musiker setzten schon früh den Nachhall gezielt in ihren Arbeiten ein.

2.1.5.2 Klangfarbe

Die Klangfarbe – auch Timbre genannt – ist die individuelle Klangqualität eines Tones, der ihn von anderen unterscheidbar macht. Sie wird von Frequenz- und Zeitverlauf³¹ sowie vom Schalldruckpegel bestimmt. Die Klangfarbe eines Werkes wird vom Komponisten vorgegeben, vom Dirigenten variiert und von den Musikern umgesetzt. Der Raum verändert zusätzlich die Klangfarbe je nachdem, ob bestimmte Frequenzbereiche abgedämpft oder verstärkt werden. So kann Musik im höheren Frequenzbereich „dumpf“ oder „grell“ und im tieferen Bereich „dünn“ oder „basslastig“ klingen.

2.1.5.3 Intimität

Die akustische Intimität entspricht der beim Zuhörer wahrgenommenen Größe eines Raumes, wobei diese heutzutage durch gezielte akustische Baumaßnahmen nicht unmittelbar der tatsächlichen Raumgröße entsprechen muss. Je nach Größe der Anfangszeit empfindet der Hörer den Raum als intim (bei 10 bis 25 ms) oder groß (40 bis 60 ms). Kompositionen sollten in der für sie vorgesehenen Intimität aufgeführt werden: Kammermusik in kleinen Räumen, klassische Symphonien in großen, schmalen Räumen und Choräle in Kathedralen.

2.1.5.4 Lebendigkeit

Wenn ein Konzertsaal einen hörbaren Nachhall erzeugt, weist er Klanglebendigkeit auf. Ein Raum, der den Schall unzureichend reflektiert, wird als „leblos“ oder „tot“ bezeichnet. Die Lebendigkeit eines Saals ist mit der Klangfülle verbunden und wird von der Nachhallzeit bei mittleren und hohen Frequenzen (250 – 1.000 Hz) bestimmt.

2.1.5.5 Wärme

Akustische Wärme (Bass Ratio³²) wird durch das Verhältnis zwischen der Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen (125 – 250 Hz) zu der Nachhallzeit bei mittleren Frequenzen (500 – 1.000 Hz) bestimmt. Je nach Verhältnis klingt ein Raum entweder „grell“ oder „basslastig“. Die Wärme ist für eine ausgezeichnete Klanggüte ausschlaggebend und kann mitunter der entscheidende Faktor sein, der einen Konzertsaal von seinen Mitstreitern absetzt.

³¹ Für die physikalische Erklärung eines Tongemisches siehe Kapitel 2.1.2.2

³² Siehe dazu Kapitel 2.2.1.1

2.1.5.6 Gesamtlautstärke

Die Gesamtlautstärke wird durch das Verhältnis von Direktschall und Nachhall bestimmt. Die **Lautstärke des Direktschalls** hängt vom Abstand des Zuschauers zur Bühne und von den Reflexionseigenschaften der bühnennahen Oberflächen ab. Der Direktschall eines Orchesters ist bei einem gestuften Publikumsbereich dann noch gut zu hören, wenn der Zuhörer nicht weiter als 20 m vom vorderen Bühnenrand entfernt ist³³. Die **Lautstärke des Nachhalls** wird von der Stärke des indirekten Direktschalls – also dem Anteil, der nicht unmittelbar auf das Publikum trifft – und der Nachhallzeit bestimmt und nimmt mit der Größe der schallabsorbierenden Oberflächen (z.B. Publikumsbereich) ab.

2.1.5.7 Klangdefinition

Klangdefinition³⁴ – auch Klarheit genannt – ist jenes Maß, mit dem die einzelnen Instrumente separat wahrgenommen werden können. Dies wird von den Fähigkeiten der Musiker, von den Absichten des Komponisten und von der Akustik des Auditoriums bestimmt. Die **horizontale Definition** (Zeitdurchsichtigkeit) bezieht sich auf die zeitliche Abfolge von Tönen und hängt von Spieltempo, Lautstärke und Phrasierung des Solisten ab. Die **vertikale Definition** (Registerdurchsichtigkeit) ist jenes Maß, mit dem gleichzeitig gespielte Töne als einzelne wahrgenommen werden können. Dies wird vom Arrangement, von der Wahl der Instrumente und von Spieldynamik und -tempo bestimmt. Folgende Kriterien bestimmen, ob der Klang „klar und definiert“ oder „trüb und verschwommen“ ist:

- Hohe Intimität: Die Anfangszeit muss kurz sein.
- Lauter Direktschall: Der Zuhörer darf nicht zu weit von der Bühne entfernt sein, und der Boden des Auditoriums sollte schräg zum hinteren Bereich aufsteigen, um streifenden Schalleinfall zu vermeiden³⁵.
- Angemessenes Verhältnis von Direktschall und Nachhall: Der Pegelunterschied zwischen Direktschall und Nachhall darf nicht zu klein sein.
- Vermeidung von Echos.

2.1.5.8 Brillanz

Brillanz beschreibt den hellen, klaren und obertonreichen Klang eines Raumes. Folgende Kriterien bestimmen die Brillanz:

³³ Vgl. BERANEK, *Music, acoustics & architecture*, 1962 S. 439

³⁴ Als Durchsichtigkeit lässt sich diese Qualität mit den Energiekriterien (siehe Kapitel 2.2.1.2) berechnen.

³⁵ Siehe auch Kapitel 2.2.2.2

- Hohe Intimität: Die Anfangszeit muss kurz sein.
- Lebendigkeit des Raumes: Höhen- und mittentreuer Nachhall sind ausreichend vorhanden.
- Lauter Direktschall: Der Zuhörer darf nicht zu weit von der Bühne entfernt sein.

2.1.5.9 Schallstreuung

Die Schallstreuung gibt an, wie der Nachhall im Auditorium verteilt wird. Je ungerichteter der Nachhall den Zuhörer trifft, desto besser ist die Streuung. Sie hängt von der Nachhallzeit und von der Sekundärstruktur (Einbauten, Nischen, Statuen, Balustraden) ab.

2.1.5.10 Balance

Die Klangbalance³⁶ betrifft einerseits die Balance unter den verschiedenen Instrumentengruppen und andererseits das Verhältnis von Hauptinstrument bzw. Gesang zur Orchesterbegleitung. Sie wird wie die Klangfarben vom Komponisten vorgegeben. Aus planerischer Sicht muss die Bühne ausreichend groß dimensioniert sein. Seitliche, schallstreuende Elemente am Bühnenrand sind auf das Orchester gerichtet, und zusätzliche Schallreflektoren an der Decke weisen ins Publikum.

2.1.5.11 Zusammenspiel

Das Zusammenspiel ist die Fähigkeit der Musiker, möglichst exakt „unisono“ zu spielen. Das betrifft die Intonation sowie das Ein- und Absetzen der Töne. Um das zu erreichen, müssen sich die Musiker auf der Bühne gegenseitig gut hören, was durch Bühnenform und den Reflexionseigenschaften der bühnennahen Begrenzungsflächen bestimmt wird.

2.1.5.12 Ansprechverhalten des Raumes

Der Musiker nimmt die Größe des Auditoriums durch die Schallreflexionen wahr, die vom Auditorium wieder zurück auf die Bühne geworfen werden. Ist die Laufzeitdifferenz zu groß, entsteht ein Echo, ist sie zu klein, klingt der Saal unnatürlich und erzeugt beim Musiker Unbehagen. Die relevanten Faktoren für ein gutes Ansprechverhalten sind die Nachhallzeit, die Anfangszeit, das Vermeiden von Echos und die Reflexionseigenschaft der Saalrückwand.

³⁶ Siehe auch Kapitel 2.2.1.2 für eine physikalische Definition

2.1.5.13 Dynamikumfang

Eine gute Konzerthalle sollte einen möglichst großen Dynamikumfang erlauben. Dieser wird am unteren Ende durch die Hintergrund- und Publikumsgeräusche und am oberen Ende durch die Spielkraft des Orchesters und den Klangcharakter des Konzertsaals begrenzt. Die Dynamik des Auditoriums muss einerseits intim genug sein, damit Passagen in „pianissimo“ ohne große Mühen verständlich sind, darf aber gleichzeitig nicht zu hoch sein, da sich die Wucht einer Passage in „fortissimo“ im Raum verlieren würde. Um das Gehör der Zuhörer zu schonen, ist auf jeden Fall das obere Ende des Dynamikumfangs zu kontrollieren.

2.1.5.14 Echos

Um Echos effizient zu vermeiden, sollten folgende Maßnahmen berücksichtigt werden:

- Möglichst wenig Schall direkt auf die Rückwand richtet.
- Bühne und vorderer Publikumsbereich durch unregelmäßige Wandoberflächen mit diffusen Schallreflexionen von mittlerer Verzögerung versorgen.
- Die Anfangszeit z.B. mit Schallschirmen gering halten.

2.1.5.15 Klangliche Verzerrungen und Störgeräusche

Neben den akustischen Faktoren können auch ungeplante klangliche Verzerrungen, also spezielle Unausgewogenheiten, die erst nach Fertigstellung zum Vorschein kommen, und sonstige Störgeräusche die Klanggüte eines Konzertsaals beeinflussen. Flatterechos, die ebenfalls zu den klanglichen Verzerrungen zählen, werden im Kapitel 2.2.2.3 noch genauer erläutert.

- **Frequenzabhängige Schallabsorption:** Wird ein Konzertsaal z.B. bewusst mit einer Decke entworfen, welche die Frequenz bei 250 Hz dämpft, hat das zur Folge, dass die Obertöne zu dieser Frequenz auch gedämpft werden. Instrumente, die auf diese Frequenzen angewiesen sind, klingen dann dünn.
- **Raumresonanzen:** Bei unachtsamer Ausführung kann ein Lüftungsgitter oder ein schlecht verschraubtes Wandblech durch Resonanzen so in Schwingung versetzt werden, dass ein Rattern oder Klingeln zu hören ist. Als Lösung eignen sich vibrationsdämmende Materialien, die zwischen Gitter und Unterfläche angebracht werden.
- **Störgeräusche:** Potenzielle Störquellen sind Lüftungssysteme, Straßenlärm, öffentliche Verkehrsmittel oder anschließende Bereiche wie Foyer, Stiegenhäuser und Probe-räume. Niederfrequenten Störungen wie z.B. Maschinenbrummen ist nur sehr schwer

entgegenzuwirken. Hausinterne Störquellen wie Lüftungen sollten vom Auditorium akustisch entkoppelt sein. Das Publikum stellt bei optimaler Außendämmung die einzige unvermeidbare Störquelle dar.

2.1.6 Raumakustik und Komposition

Die frühen Komponisten waren in ihren musikalischen Stilmitteln durch die Akustik der verfügbaren Aufführungsmöglichkeiten (Gasthäuser, Kirchen, Ballsäle etc.) begrenzt, weswegen die jeweilige Musik entsprechend ihrer Epoche unterschiedliche Nachhallzeiten verlangte, um am besten zur Geltung zu kommen. Vom 17. bis ins 20. Jahrhundert war diese Abhängigkeit besonders deutlich. Erst mit der wachsenden Vielfalt an Konzertsälen aus sämtlichen Musikepochen löste sich die Bindung zwischen Raumakustik und Komposition. Übersichtshalber werden die idealen Nachhallzeiten nach Epochen angeführt.

2.1.6.1 Barock (1600 – 1750)

Musikstücke aus dem Barock wie Werke von z. B. Händel oder Bach sind besonders rhythmisch und melodisch, wobei mehrere Stimmführungen gleichzeitig gespielt oder gesungen werden. Besonders wichtig ist die Klarheit dieser Werke, weshalb kleine, intime Räume wie die frühen Musizierkammern oder Wohnzimmern mit einer **sehr kurzen Nachhallzeit von unter 1,5 s**³⁷ am besten geeignet sind. Die harten Raumbegrenzungsflächen verstärken zusätzlich die ersten Reflexionen und lassen die Musik bei geringer Klangfülle nah und definiert klingen.

2.1.6.2 Klassik (1750 – 1820)

Die klassische Periode zeichnet sich durch Symphonien und Sonaten von z.B. Haydn, Mozart oder Beethoven aus, welche eine klare Trennung von Hauptstimme und Orchesterbegleitung vorsahen. Zu jener Zeit entstanden wegen der steigenden Beliebtheit von Musikaufführungen die ersten Konzertsäle. Diese meist rechteckigen, schmalen Räume zeichnen sich durch eine **mittlere Nachhallzeit von 1,7 s**³⁸ aus.

2.1.6.3 Romantik (1820 – 1900)

Die romantische Epoche ist durch Werke von z. B. Schubert, Mendelssohn, Brahms, Wagner oder Debussy geprägt, welche weniger formal interessant waren, sondern die zeitgenössischen Empfindungen und Gefühlswelten ausdrückten. Das Orchester wurde

³⁷ BERANEK, *Music, Acoustics and Architecture*, 1962, S. 472

³⁸ BERANEK, *Music, Acoustics and Architecture*, 1962, S. 472

größer besetzt und gewann dadurch an Lautstärke. Die einzelnen Stimmen der Klanggruppen waren nicht mehr zu unterscheiden, und mehrere Melodien verschmolzen zu einem musikalischen Gesamteindruck, der nur als Summe zu erfassen war. Die Säle klangen aufgrund der relativ **langen Nachhallzeit von 2,2 s**³⁹ voll und laut, vermissten aber Klangdefinition.

2.1.6.4 Moderne ab dem 20. Jahrhundert

Am Anfang des 20. Jahrhunderts waren Konzertbesuche beliebter denn je. Neben der Vielfalt an Musikrichtungen aufgrund des Repertoires der letzten Jahrhunderten entstanden neue Werke mit frischen Harmonien und Dissonanzen, neuen Instrumentierungen oder außergewöhnlichen Effekten wie Tonbändern. Diese Neue Musik verlangte nach Räumen mit variabler Akustik, die neben üblichen Aufführungen auch Klangexperimente erlaubten. Durch Radio und Fernsehen veränderten sich die Hörgewohnheiten der Menschen, die sich den distinktiven Klang einer Tonbandaufnahme nun auch im Konzerthaus wünschten. Der trockene und definierte HiFi-Konzertsaal mit einer **kurzen Nachhallzeit von 1,6 s**⁴⁰ konnte dieser Forderung entsprechen.

2.2 Konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung der Raumakustik

Der Wissensstand auf dem Gebiet der Raumakustik ist heutzutage so weit fortgeschritten, dass praktisch jede Grundform eines Auditoriums – die **Primärstruktur** – durch die richtige Planung des Innenausbaus und Oberflächengestaltung – die **Sekundärstruktur** – akustisch optimiert werden kann. Dennoch sollte die Anpassung der Sekundärstruktur nur der Feinabstimmung der Raumakustik dienen, weswegen schon bei der Planung der Primärstruktur eine den jeweiligen Anforderungen entsprechende Saalform gewählt und potenzielle Fehlerquellen vermieden werden müssen. In dieser Phase können Konflikte zwischen raumästhetischen Vorstellungen und raumakustischen Prinzipien entstehen: Die extreme Fächerform vermindert die für Musikdarbietungen wichtigen seitlichen Wandreflexionen, erlaubt aber mehr Sitzplätze. Tiefe Ränge verschlechtern die ausgewogene Schallausbreitung bis in die hinteren Reihen, führen aber das Publikum näher an die Bühne. Konkave Grundformen können Echos hervorrufen, heben sich aber optisch von der Vielzahl an Schuhschachtelsälen ab.

Die Raumakustik heutiger Saalbauten weist keine extremen Schwankungen zwischen „schlecht“ und „ausgezeichnet“ auf, vielmehr handelt es sich um feine Nuancen im gut klingenden Bereich, denen noch immer eine gewisse planerische Willkür zugrunde liegt.

³⁹ BERANEK, *Music, Acoustics and Architecture*, 1962, S. 472

⁴⁰ BERANEK, *Music, Acoustics and Architecture*, 1962, S. 427

Denn neben der Raumakustik nehmen auch andere Faktoren wie Bühnentechnik, Belüftung, Beleuchtung, Erschließung etc. auf das Gesamtergebnis Einfluss. Letzten Endes ist eine Vielfalt in den Klangerlebnissen der heutigen Aufführungsstätten durchaus wünschenswert, denn sie erlaubt viele verschiedene Interpretationsmöglichkeiten desselben Werkes.

2.2.1 Raumakustische Kriterien

Das offensichtlichste akustische Bewertungsmerkmal eines Raumes ist dessen Halligkeit, die durch die **Nachhallzeit** bestimmt wird. Sie zählt zu den wichtigsten Faktoren neben den sogenannten **Energiekriterien**. Das sind jene Eigenschaften, die durch unterschiedliche Verhältnisse der zeitlichen und bei Musik auch räumlichen Verteilungen der vom Zuhörer wahrgenommenen Schallenergien bestimmt werden (z. B. Verhältnis Direktschall W_D zu Gesamtenergie W_{ges}). Besonders wichtig sind hier die Energieanteile der ersten Reflexionen, die dem Direktschall in der Sprache innerhalb von 50 ms und in der Musik innerhalb von 80 ms folgen. Diese Verteilungen lassen sich anhand einer **Raumimpulsantwort** darstellen (siehe Abb. 33). Das ist eine Messung des Schalldruckes, die das Schallfeld an einem bestimmten Hörerort beschreibt und den zeitlichen Ablauf der eintreffenden Schallenergien als schematisches Diagramm darstellt.

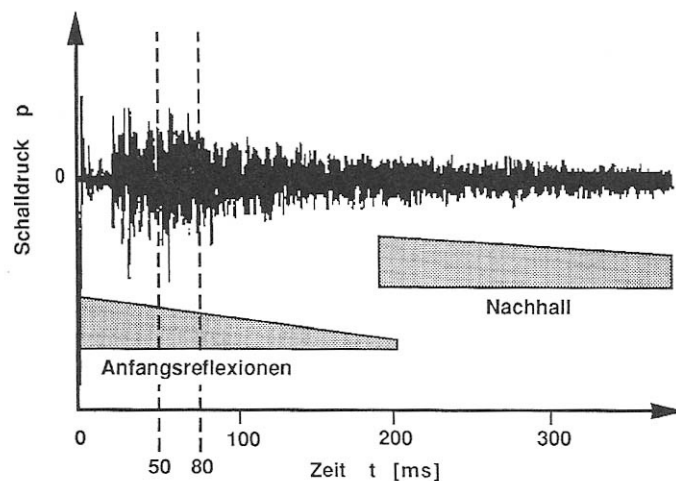


Abb. 33: Beispiel einer Raumimpulsantwort
(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 135)

Höreindruck	Kriterium	Optimum	
		Sprache	Musik
Nachhall, Klangfarbe	Nachhallzeit T (s. Bilder 4.54 u. 4.55)	ca. 1 s	ca. 2 s
	Anfangsnachhallzeit EDT	—	ca. 2,2 s
	Baßverhältnis BR	—	1,1 bis 1,3
Deutlichkeit,	Deutlichkeitsgrad D_{50}	> 50%	—
Durchsichtigkeit	Deutlichkeitsmaß C_{50}	> 0 dB	—
	Schwerpunktzeit TS	< 80 ms	100 bis 150 ms
	Klarheitsmaß C_{80}	—	−1 bis +3 dB
	Artikulationsverlust für Konsonanten AI_{cons}	< 15%	—
	Sprachübertragungsindex RASTI	> 50%	—
Raumeindruck	Hallmaß H	—	+3 bis +8 dB
	Seitenschallgrad LF	—	25 bis 40%
	Seitenschallmaß $10 \lg LF$	—	−4 bis −7 dB
	Raumeindrucksmaß R	< 0 dB	+1 bis +7 dB
Lautstärke	Schalldruckpegelminderung ΔL	< 5 dB(A)	< 5 dB(A)
	Stärkemaß G	+1 bis +10 dB	+1 bis +10 dB

Abb. 34: Raumakustische Kriterien und ihre Optimalwerte
(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 136)

2.2.1.1 Nachhallzeit

Je nach Grundform des Raumes werden die Schallwellen nach einem bestimmten Muster reflektiert. Gewisse Wellenlängen beginnen aufgrund der Abmessungen und Form des Raumes in ihrer Eigenfrequenz zu schwingen und erzeugen **Resonanzen**, indem sie ihre Grundfrequenz und die dazugehörigen Obertöne verstärken. Dafür muss die Wellenlänge genau einer Raumlänge, -breite, -höhe oder einem Vielfachen jener Abmessungen entsprechen. Die Resonanzen und die folgende Abklingphase erzeugen als hörbaren Effekt den **Raumhall**. Wissenschaftlich gesagt ist die **Nachhallzeit** T oder RT (Reverberation Time) jene Zeitspanne, in welcher der Schalldruck auf ein Tausendstel seines Ausgangswertes bzw. der Schalldruckpegel um 60 dB sinkt, nachdem das Ausgangssignal beendet ist. Sie lässt sich nach Wallace Sabine wie folgt berechnen:

$$T = 55,3 \cdot [V / (A \cdot c_0)] = 0,163 \cdot (V / A) \text{ [s]} \quad (12)^{41}$$

V ...Raumvolumen [m^3]

c_0 ...Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Luft; $c_0 \approx 340 \text{ m/s}$

A ...äquivalente Schallabsorptionsfläche [m^2]

⁴¹ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 136

Aufgrund der heutigen Erfahrungswerte mit der Nachhallzeit lassen sich optimale Werte für Räume nach verschiedenen Funktionen und Größe festlegen. Abb. 35 zeigt diese **Optimalwerte für die Nachhallzeit** T_m bei mittleren Frequenzen, wobei mit einer relativ breiten Toleranz von 20 % zu rechnen ist.

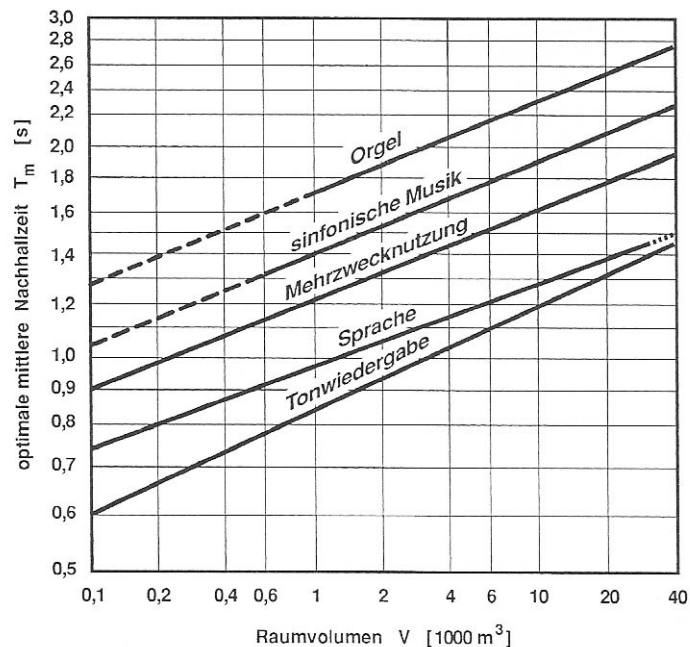


Abb. 35: Optimale mittlere Nachhallzeiten T_m bei 500 bis 1.000 Hz für verschiedene Raumfunktionen abhängig vom Raumvolumen V (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 139)

Die optimalen Nachhallzeiten im mittleren Frequenzbereich sind bei **Sprache** generell niedriger als bei **Musik**, wobei hier die Nachhallzeit von der jeweiligen Art der Musikaufführung (Orgelmusik, Klassik, Kammermusik) abhängig ist. Bei einem **Mehrzwecksaal** müssen Zwischenwerte gewählt werden, die sich vorrangig an der Hauptanwendung des Saals orientieren. Während der Frequenzverlauf für eine sprachoptimierte Nachhallzeit möglichst linear sein sollte, verträgt der Nachhall in der Musik eine leichte Anhebung in den tiefen Frequenzen unterhalb von 250 Hz, da das die geringere Hörbarkeit von tiefen Frequenzen ausgleicht und dem Klang Wärme verleiht. Die Eigenschaft **Bassverhältnis** BR (Bass Ratio) stellt das Verhältnis der Nachhallzeiten bei tiefen sowie mittleren und hohen Frequenzen dar:

$$BR = (T_{125} + T_{250}) / (T_{500} + T_{1000}) \quad (13)^{42}$$

Der optimale Wert für BR liegt bei einem Konzertsaal zwischen 1,1 und 1,3. Ist die **Nachhallzeit zu lang**, werden in der Sprache die Silben durch die Abklingphasen der vorhergehenden Silben verdeckt, und die Verständlichkeit leidet darunter. Musik tendiert

⁴² FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 138

bei einer bewussten Bassanhebung dazu, mulmig und undefiniert zu klingen. Ist die **Nachhallzeit zu kurz**, hat der Raum eine „trockene“ Akustik, was die Darbietung des Sprechers bzw. Musikers erschwert, da der Raum weder mit der Interpretationen interagiert noch auf die Spieldynamik reagiert. Des weiteren sinkt die Gesamtlautstärke, was sich vor allem im hinteren Publikumsbereich nachteilig auswirkt.

2.2.1.2 Energiekriterien

Die Klanggüte eines Zuhörerplatzes wird neben der ortsunabhängigen Nachhallzeit durch das Verhältnis der Energien von **Direktschall** W_D , **Anfangsreflexionen** W_I (I...initial) sowie **Nachhall** W_R (R...Reverberation) zur Gesamtenergie W_{Ges} bestimmt. Der Direktschall muss als erste Voraussetzung unbedingt ohne Unterbrechung zum Zuhörerplatz gelangen. In weiterer Folge lässt sich die Akustik anhand der jeweiligen Energieverhältnisse beschreiben, wobei vor allem der für Sprache und Musik gleichermaßen wichtige mittlere Frequenzbereich (bei der Oktave mit der Mittenfrequenz von 1.000 Hz) relevant ist.

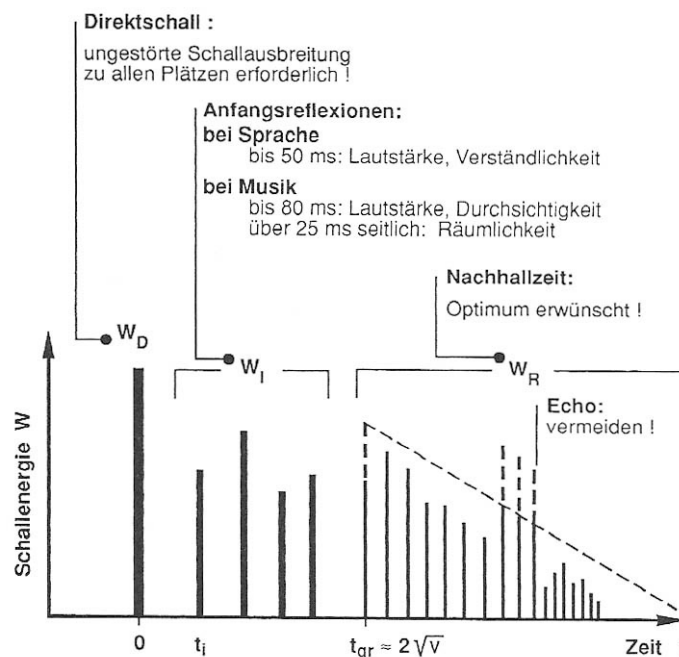


Abb. 36: Schematische Raumimpulsantwort: t_i ...Zeit zwischen Direktschall und erster Reflexion (Initial Time) [ms], t_{gr} ...Grenzzeit für den Übergang von Anfangsreflexionen zu den diffusen Reflexionen (Nachhall) [ms], V ...Volumen [m^3] (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 149)

Räume für Sprache weisen eine gute Raumakustik auf, wenn die Sprachverständlichkeit ausgeprägt ist. Eine gute Artikulation des Sprechers vorausgesetzt, ist die **Silbenverständlichkeit** der Prozentsatz von zusammenhanglosen Silben, die der Hörer richtig versteht. Bei 50 % ist sie gut, bei über 70 % ist sie sehr gut. Weitere Faktoren, welche die Verständlichkeit beeinflussen, sind der Schalldruckpegel (vor allem im Verhältnis zum

Grundgeräuschpegel), die Nachhallzeit und die Schallenergie der Anfangsreflexionen, die bis 50 ms nach dem Direktschall beim Hörer eintreffen. Als objektive Maßeinheit dient der **Deutlichkeitsgrad** D_{50} , auch **Deutlichkeit**:

$$D_{50} = W_{0...50 \text{ ms}} / W_{\text{Ges}} \quad (14)^{43}$$

$W_{0...50 \text{ ms}}$...Energie aller bis 50 ms nach dem Ausgangsereignis einfallenden Schallereignisse

Und das **Deutlichkeitsmaß** C_{50} :

$$C_{50} = 10 \lg * (W_{0...50} / W_{50... \infty}) [\text{dB}] \quad (15)^{44}$$

Ein Deutlichkeitsgrad von $D_{50} > 50 \%$ oder ein Deutlichkeitsmaß von $C_{50} > 0 \text{ dB}$ bedeutet eine sehr gute Silbenverständlichkeit von über 70 %. **Räume für Musik** legen den Schwerpunkt nicht auf die verständliche Kommunikation. Vielmehr ist die Klanggüte von der subjektiven und emotionalen Wahrnehmung der Zuhörer abhängig, was eine wissenschaftliche Herangehensweise tendenziell erschwert. Dennoch lassen sich gewisse raumakustische Grundkriterien festlegen, die eine präzisere Planung von Aufführungsstätten für Musik ermöglichen. Ein besonders wichtiges Kennzeichen ist die **Durchsichtigkeit**, also die Unterscheidbarkeit der Einzeltöne in einer Klangsequenz (Zeitdurchsichtigkeit) und die Unterscheidbarkeit von gleichzeitig gespielten Tönen (Registerdurchsichtigkeit). Sie lässt sich objektiv durch das **Klarheitsmaß** C_{80} mithilfe der Schallenergie der Anfangsreflexionen, die bis zu 80 ms nach dem Direktschall beim Hörer eintreffen, darstellen.

$$C_{80} = 10 \lg * (W_{0...80 \text{ ms}} / W_{80 \text{ ms}... \infty}) [\text{dB}] \quad (16)^{45}$$

Je nach Art der Musikaufführung sind unterschiedliche Klarheitsmaße erwünscht. So verlangt z. B. die klassische Musik mehr Durchsichtigkeit als die romantische Musik, weswegen die Optimalwerte des Klarheitsmaßes von -1 bis +3 dB gestreut sind. Das Verhältnis zwischen den frühen, durchsichtigkeitsfördernden und späten, diffusen Reflexionen, die vor allem den **Raumeindruck** bewirken, wird durch das **Hallmaß** H definiert, dessen Optimalwerte +3 bis +8 dB betragen sollte.

$$H = 10 \lg * (W_{50 \text{ ms}... \infty} / W_{0...50 \text{ ms}}) [\text{dB}] \quad (17)^{46}$$

Neben der Halligkeit eines Raumes bestimmen als zweitwichtigste Größe die ersten Seitenreflexionen den Raumeindruck einer Musikaufführung. Sie verleihen ihr Räumlich-

⁴³ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 150

⁴⁴ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 150

⁴⁵ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 151

⁴⁶ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 151

keit. Der **Seitenschallgrad** LF (Lateral Energy Fraction) dient dazu, den Seitenschallanteil zu messen:

$$LF = (W_{5...80ms})_{\text{seitl.}} / W_{0...80ms} \quad (18)^{47}$$

$(W_{5...80ms})_{\text{seitl.}}$ entspricht der Schallenergie der seitlichen Anfangsreflexionen, die bis 80 ms nach dem Direktschall einfallen, abzüglich des Direktschallanteils. Dieser Wert sollte optimalerweise zwischen 25 und 40 % liegen. Auf das **Seitenschallmaß** ($10 \lg * LF$) umgerechnet, sollte der Wert zwischen -6 und -4 dB liegen. Um die Ausgewogenheit zwischen Halligkeit bzw. Diffusität sowie frühen seitlichen Reflexionen und Bühnenklang zu bestimmen, wird das **Raumeindrucksmaß** verwendet:

$$R = 10 \lg * [W_{25ms...unendlich} - (W_{25...80ms})_{\text{vorn}}] / [W_{0...25ms} + (W_{25...80ms})_{\text{vorn}}] \text{ [dB]} \quad (19)^{48}$$

$(W_{25...80ms})_{\text{vorn}}$ entspricht der Schallenergie, die von vorne innerhalb eines Winkels von 80° auf den Hörer eintrifft. Dieser Wert sollte optimalerweise zwischen +1 und +7 dB liegen.

Die **Lautstärke** muss sowohl bei Sprache als auch bei Musik angemessen hoch sein. Die **Schalldruckpegelminderung** ΔL zwischen der ersten und der letzten Reihe sollte nicht mehr als 5 dB betragen. Neben der Gesamtlautstärke einer Musikaufführung ist auch die **Balance**, also das Lautstärkeverhältnis der einzelnen Instrumentengruppen untereinander und zum Sänger bzw. Solisten, eine relevante Größe. Generell unterscheidet man bei einem Sinfonieorchester folgende Gruppen: Streichinstrumente, Holzblasinstrumente, Blechblasinstrumente und Bassinstrumente. Bei einer guten Balance erzeugen die Holzblasinstrumente den niedrigsten Schalldruckpegel. In weiterer Folge sollten die Streichinstrumente um 6 dB, die Blechblasinstrumente um 8 dB und der Gesang um 3 dB größer sein als der Schalldruckpegel der Holzblasinstrumente. Eine weitere ortsspezifische Kenngröße für die raumakustische Güte ist die **Intimität**, also die Nähe, mit welcher der Zuhörer die Musik empfindet. Hohe Intimität wird bei einer Anfangszeit, also Verzögerung zwischen Direktschall und erster Anfangsreflexion, zwischen 10 und 25 ms erreicht⁴⁹.

2.2.2 Raumakustische Planung – Ziele und Methoden

2.2.2.1 Zielstellung

Die raumakustische Planung beginnt bei der **Primärstruktur**, welche vornehmlich die Raumgröße und Grundform sowie die Anordnung von Bühne und Zuschauerbereich

⁴⁷ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 152

⁴⁸ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 152

⁴⁹ Vgl. FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 153

betrifft, und wird bei der **Sekundärstruktur** fortgesetzt, wo die Oberflächengestaltung und Innenausstattung mit der Verteilung von schallschluckenden bzw. reflektierenden Flächen geplant werden. Zur raumakustischen Messung dienen rechnerische sowie grafische Methoden, Modellmessverfahren und Computersimulationen. Welche Methode zum Einsatz kommt, hängt von der Funktion und der Größe des Raumes und dem damit verbundenen Berechnungsaufwand ab, wobei gerade die Planung von großen Mehrzweckbauten (wie z. B. Kirchen oder Stadthallen) aufgrund der unterschiedlichen bis teils gegensätzlichen raumakustischen Anforderungen für Sprache und Musik mit erheblichen Aufwand verbunden ist.

Sind **akustische Funktion** und **Publikumskapazität** bestimmt, lässt sich mithilfe der Volumenkenzahl (siehe Abb. 37) das **optimale Volumen** berechnen. Die **Raumform** unterliegt heutzutage im Gegensatz zum Volumen keinen strengen Regeln, wenn auch gewisse Erfahrungswerte bezüglich der Nutzungsarten in eine bestimmte Richtung deuten. Dennoch ist sie maßgeblich für die Energiekriterien verantwortlich, da durch die Form die Versorgung mit Direktschall und die zeitliche und räumliche Verteilung der Anfangsreflexionen bestimmt werden. Als primäres Planungsziel sowohl bei Räumen für Sprache als auch für Musik sollte der Direktschall ungestört zu jedem Zuhörer gelangen und dabei von nützlichen Frühreflexionen unterstützt werden⁵⁰.

Nutzung	Volumenkenzahl K [m ³ /Platz]	maximales Volumen V [m ³]
Versammlungsräume, Seminarräume	3 ... 5	1 000
Sprechtheater, Hörsäle, Plenarsäle, Kongreßräume	4 ... 6	5 000
Mehrzwecksäle für Sprache und Musik	4 ... 7	8 000
Musiktheater (Oper und Operette)	5 ... 8	15 000
Kammermusiksäle	6 ... 10	10 000
Konzertsäle für sinfonische Musik	8 ... 12	25 000
Räume für Orgelmusik	10 ... 14	30 000

Abb. 37: Volumenkenzahlen K und maximale Volumina V für Räume verschiedener Nutzung (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 142)

2.2.2.2 Sitzreihenüberhöhung

Wenn der Schall von der Bühne über die Köpfe des Publikums streift, verliert er durch das physikalische Prinzip der Beugung bis zu den hinteren Reihen an Lautstärke und Höhen.

⁵⁰ Vgl. FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 155

Deswegen ist es vor allem in großen Räumen und ab mehr als zehn Sitzreihen angebracht, den Publikumsbereich zu überhöhen. Die Versorgung mit Direktschall vergrößert sich mit dem **Blickfeldwinkel** α , also dem Winkel zwischen der Schalleinfallsrichtung und der Steigung des Publikumsbereiches am jeweiligen Sitzplatz (dick strichlierte Linie in der Grafik). Dieser Winkel sollte mindestens 15° betragen (siehe Abb. 38), was bei einer zunehmenden Distanz zur Bühne eine größere **Überhöhung** d bedeutet. In einem großen Auditorium sollte die mittlere Reihenbreite 0,9 m und die mittlere Sitzbreite 0,6 m betragen, was einen Platzbedarf von etwa $0,6 \text{ m}^2$ pro Person bedeutet⁵¹.

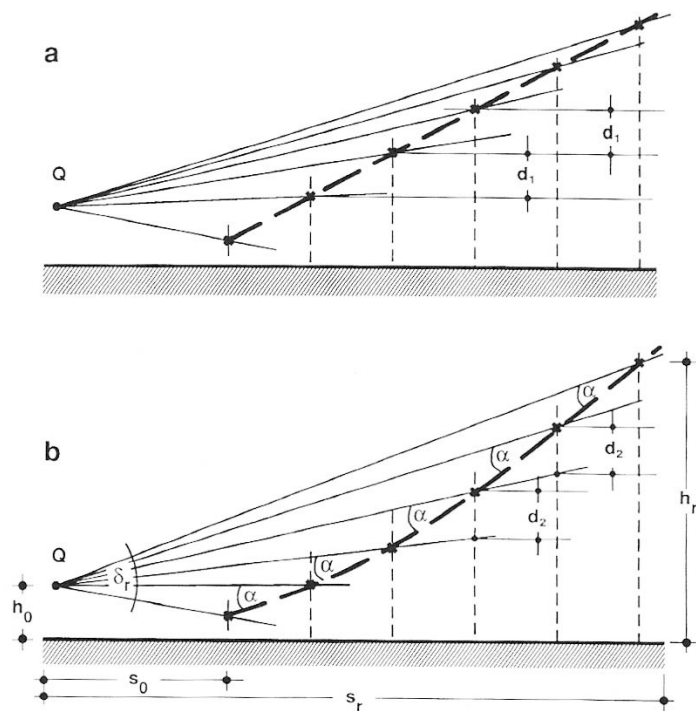


Abb. 38: Sitzreihenüberhöhung: a) gleichbleibende Überhöhung d_1 : ungünstig; b) gleichbleibender Blickfeldwinkel (Glanzwinkel) α , gleichbleibende Überhöhung d_2 : günstig (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 156)

Die Höhe des Sitzplatzes in Bezug auf die Entfernung zu Schallquelle lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$h_r = h_0 + s_r \tan (\delta_r - \alpha) \text{ [m]} \quad (20)^{52}$$

h_0 ...Höhe der Schallquelle über dem Saalfußboden [m]

s_0 ...Abstand der vorderen Sitzreihe zur Schallquelle Q [m]

s_r ...Abstand der hinteren Sitzreihe zur Schallquelle Q [m]

δ_r ...Winkel der von Q ausgehenden Schallstrahlen zwischen den Sitzplätzen, die s_0 und s_r von Q entfernt sind [°]; $\delta_r = \alpha \ln (s_r / s_0)$

α ... Blickfeldwinkel; $\alpha \approx 15^\circ$

⁵¹ Vgl. FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 156

⁵² FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 157

2.2.2.3 Anfangsreflexionen in kleinen Auditorien

Anfangsreflexionen können in einem Raum für Sprache dort, wo der Direktschall zu schwach ausfällt, die platzspezifische Raumakustik verbessern. Dies ist oft in der Mitte oder im hinteren Bereich eines Raumes nötig und wird durch **gezielte Reflexionen** über die Raumbegrenzungsflächen erreicht. Die Anfangsreflexionen sollten bei Sprache spätestens nach 50 ms bzw. 17 m nach dem Direktschall beim Zuhörer eintreffen⁵³. Abb. 39 zeigt, wie die Anfangsreflexionen mit grafischen Methoden ermittelt werden können.

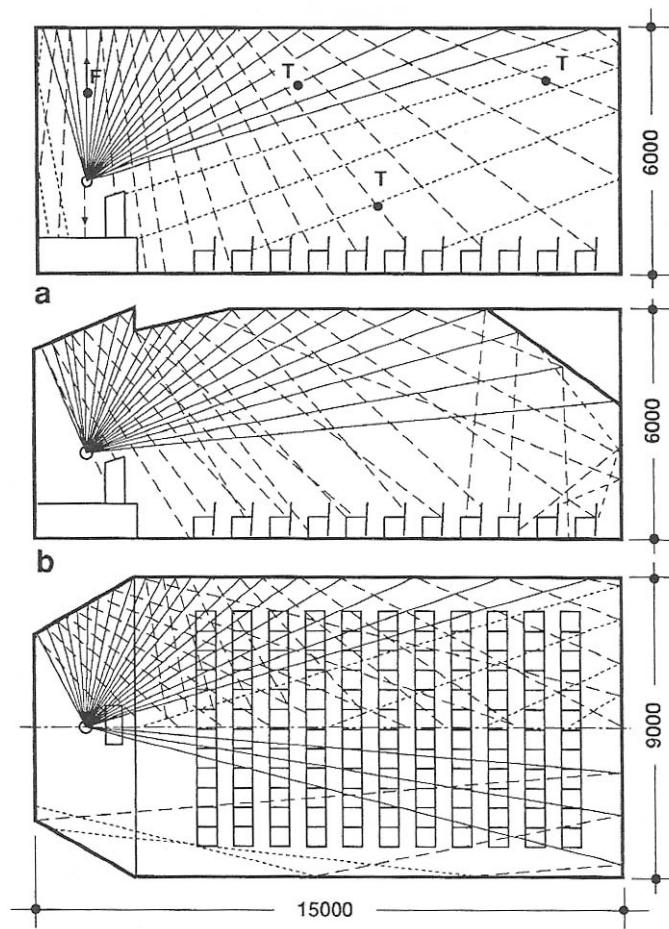


Abb. 39: Anwendung der grafischen Planungsmethode beim Entwurf eines Vortragsraumes: Direktschallfächer – durchgezogene Linien/Erste Reflexionen – gestrichelte Linien/Zweite Reflexionen – gepunktete Linien; a) Deckenreflexionen bei ebener Decke mit Flatterecho F und „Theaterecho“ T, b) Deckenreflexionen nach Optimierung der Deckenform, c) Seitenwandreflexionen (obere Saalhälfte) und Rückwandreflexionen (untere Saalhälfte) im Grundriss

(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 158)

Beim oberen Saal werden die Anfangsreflexionen in der hinteren Hälfte wegen der flachen Decke deutlich weniger als beim unteren Saal, der durch die auf die Mitte gerichteten, geneigten Deckenabschnitte im vorderen und hinteren Bereich die Reflexionen viel gleichmäßiger im Raum verteilt. Bei einer horizontalen Decke kann es über

⁵³ Vgl. FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 157

Decke und Rückwand im vorderen Bereich zu Wegdifferenzen von etwa 25 m bzw. zu Verzögerungen von 75 ms zwischen Direktschall und den **zweiten Reflexionen** kommen, was zu hörbaren Echos führt und die Sprachverständlichkeit vermindert⁵⁴. Diese **Theaterechos** sind vor allem in großen Auditorien zu finden. Zweite Reflexionen können bei geneigter Decke entweder durch die Publikumsabsorption verhindert werden oder werden so berechnet, dass sie den hinteren Bereich kurz nach dem Direktschall erreichen, was der Deutlichkeit zugute kommt.

Ein weiteres akustisches Problem, das bei ebenen Raumboberflächen auftreten kann, ist das sogenannte **Flatterecho**, welches entsteht, wenn Raumbegrenzungsflächen parallel zueinander stehen und den Schall hin- und herwerfen. Das Flatterecho kann durch Schrägstellung einer Wand oder Decke, durch die Sekundärstruktur (Winkel $> 5^\circ$) oder durch Anbringung eines breitbandig wirksamen Schallabsorber vermieden werden. Gerade im Bühnenbereich können langverzögerte Reflexionen über die Rückwand zu Echos führen. In diesem Fall sollten die betreffenden Wände strukturiert, gefaltet, geneigt oder einseitig schallabsorbierend ausgeführt werden. Ebenfalls sollten zur Bühne parallele Decken vermieden werden.

2.2.2.4 Saalgrundriss und Schallquellenstandort

2.2.2.4.1 Rechteckiger Saalgrundriss

Abb. 40 zeigt verschiedene Anordnungen der Bühne in einem rechteckigen Saalgrundriss.

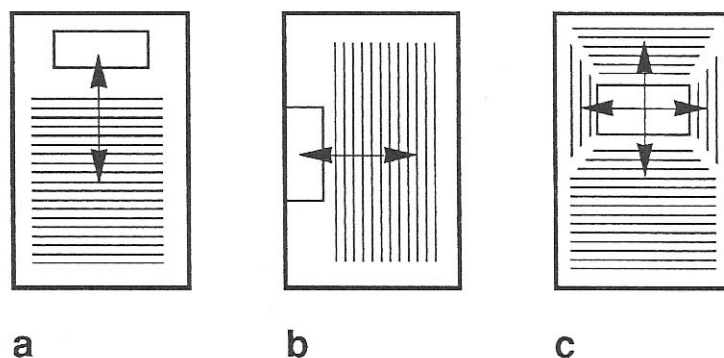


Abb. 40: Verschiedene Podiums- und Bühnenanordnungen bei rechteckigen Saalgrundrissen: a) vor schmaler Wand, b) vor breiter Wand, c) von den Wänden abgerückt
(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 160)

Die für ältere **Konzertsäle in Schuhschachtelform** typische Anordnung der Bühne an einer Stirnseite führt zu nützlichen Seitenreflexionen, die bei einem Raum mit maximal 20 m Breite und ausreichend hoher Decke von mindestens 16 m die Grundlage für eine

⁵⁴ Vgl. FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 158

ausgezeichnete Raumakustik legen. Wird die Bühne an die Mitte einer Längsseite gelegt, dann fehlen zwar die Seitenreflexionen, dennoch ist der Raum aufgrund der geringen mittleren Zuhörerdistanz zur Bühne für Sprache durchaus gut geeignet. Gelegentlich wird die Bühne wie bei Zentralbauten üblich leicht zur Mitte und von den umgebenden Wänden abgerückt, um den Publikumsbereich um die Bühne herum zu erweitern, was die Intimität und die Sichtverhältnisse verbessern soll. Dabei wird vorsätzlich eine klangliche Unausgewogenheit auf den seitlichen Sitzplätzen in Kauf genommen, wo nur die nahen Instrumentengruppen ausreichend gut gehört werden. Auch die Plätze hinter der Bühne leiden unter der Gerichtetheit einiger Orchesterinstrumente und der Stimme zum vorderen Publikumsbereich hin. Hier fehlt es folglich an Brillanz.

2.2.2.4.2 Fächerform

Der fächerförmige Grundriss ist für Musikaufführungen ohne Beschallungsanlage eher ungünstig, da die frühen Seitenreflexionen in der Mitte des Raumes nur noch mangelhaft vorhanden sind. Bei Räumen für Sprache, wo die durch Seitenreflexionen erzeugte Räumlichkeit für das Hörerlebnis nicht so ausschlaggebend ist, kommt die Fächerform durchaus vor, da sich das Publikum im Schnitt näher bei der Schallquelle befindet.

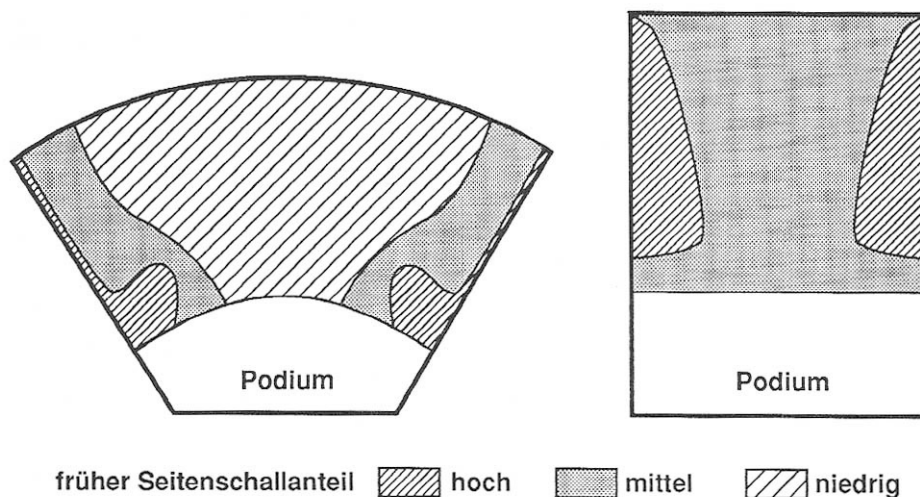


Abb. 41: Vergleich typischer Verteilung des Seitenschallgrades LF in fächerförmigen und rechteckigen Sälen (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 162)

Um die fehlenden Seitenreflexionen zu kompensieren, kann die Sekundärstruktur der Decke dreiecksförmig ausgebildet werden (siehe Abb. 42). Somit bleibt je nach Art der Reflexionslenkung die Wahl zwischen diffusen Reflexionen, um die Lautstärke im mittleren Publikumsbereich zu erhöhen, oder frühen Reflexionen, um die Klarheit zu steigern.

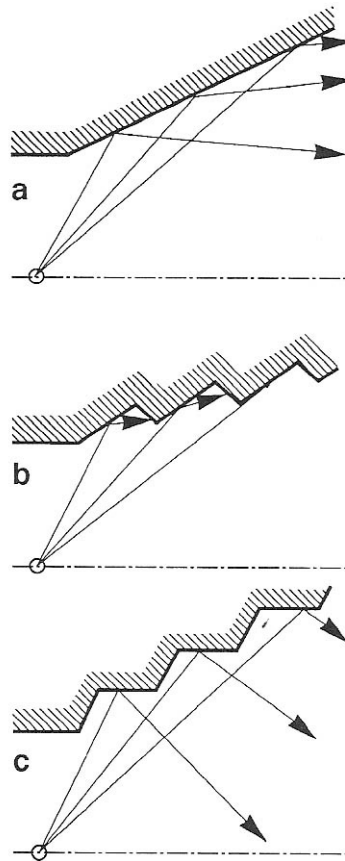


Abb. 42: Reflexionslenkung in fächerförmigen Sälen: a) nach hinten, b) diffuse Reflexionen, c) zur Saalmitte (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 163)

2.2.2.5 Wand- und Deckenformen, Ränge, Balkone und Galerien

Nach Festlegung der Primärstruktur kann je nach Nutzungsart anhand der Volumenkenzahl (siehe Abb. 37) die **optimale Deckenhöhe** ermittelt werden. Prinzipiell werden bei Räumen für Musik höhere Decken als bei Räumen für Sprache benötigt. Bei **Räume für Sprache** muss die Decke die Schallenergie gezielt in den mittleren und hinteren Publikumsbereich lenken, um dort die aufgrund der natürlichen Schallausbreitung geringere Lautstärke zu kompensieren. Zwischen Direktschall und Anfangsreflexionen dürfen keine Laufwegdifferenzen von über 17 m entstehen, um die Sprachverständlichkeit zu bewahren. Das entspricht einer Laufzeitdifferenz von 50 ms. Angemessen ist eine Decke mit 8 m Höhe über der Schallquelle mit Deckensegmenten von 10° bis 20° Neigung zum Publikumsbereich hin⁵⁵.

Räume für Musik verlangen höhere Decken, um die nötige Räumlichkeit zu erreichen. Als Richtwert sollten Decken in Kammermusiksälen 10 m und in Konzertsälen für

⁵⁵ Vgl. FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 167

sinfonische Musik zwischen 15 und 18 m über dem Bühnenboden liegen⁵⁶. Sind aus anderen Gründen höhere Decken erforderlich, muss ein Schallschirm zur Schallverteilung installiert werden. Ein Teil der Reflexionen wird in den hinteren Publikumsbereich und ein anderer Teil zurück auf die Bühne gelenkt, wo die Reflexionen für die klangliche Balance des Orchesters und für das bessere Zusammenspiel der Musiker sorgen. Der **hintere Deckenbereich** sollte die Reflexionen wieder in den mittleren und hinteren Publikumsbereich lenken. Je weiter die Decke von der Schallquelle entfernt ist, desto feingliedriger sollte die Sekundärstruktur ausgeführt werden, um den Schall immer diffuser zu brechen. Z. B. besteht die Decke des Neuen Gewandhauses in Leipzig aus Zylindersegmenten, die in Bühnennähe größer und flacher und zur Rückwand hin kleiner und tiefer strukturiert sind. So ändern sich die Reflexionen über die Deckenlänge hinweg fließend von geometrisch gerichtet bis zu diffus streuend.

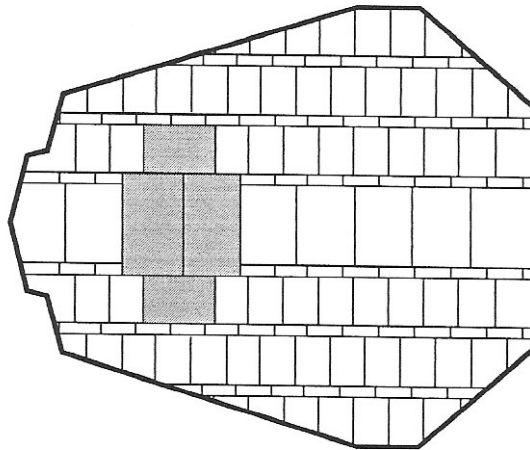


Abb. 43: Deckenplan im Neuen Gewandhaus Leipzig
(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 167)

Was für die Decke bezüglich der Reflexionen in den hinteren Publikumsbereich gilt, trifft auch auf die **horizontale Ausrichtung der Seitenwände** zu. Je größer der von den Seitenwänden beschriebene Öffnungswinkel von der Bühne aus ist, desto mehr Schall wird auf den hinteren Publikumsbereich gelenkt, aber bei gleichzeitiger Verminderung der Seitenreflexionen in der Saalmitte. Auch die **vertikale Neigung der Seitenwände** kann sich auf die Raumakustik auswirken. Sind die Wände nach innen geneigt, wird der Schall in das schallabsorbierende Publikum gelenkt, was eine Verkürzung der Nachhallzeit zur Folge hat. Sind die Wände nach außen geneigt, wird der Schall an die Decke geworfen, und die Nachhallzeit lässt sich gewissermaßen regulieren – vorausgesetzt, dass die Deckenoberfläche reflektierend ausgebildet ist.

⁵⁶ Vgl. FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 167

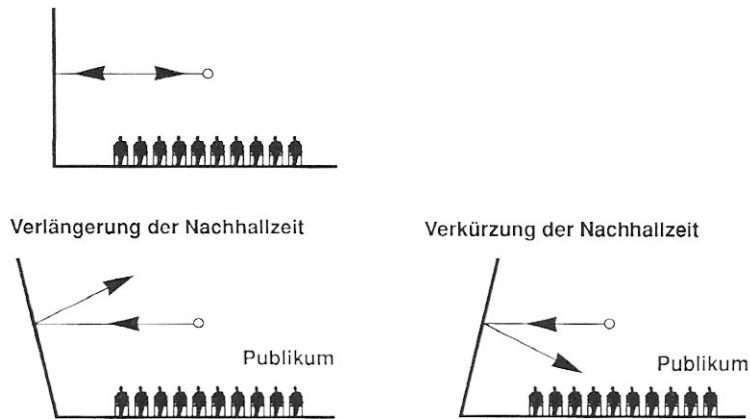


Abb. 44: Verlängerung und Verkürzung der Nachhallzeit durch schräge Wandflächen
(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 169)

Balkone, Galerien und Ränge gliedern den Saal zusätzlich zur Sekundärstruktur und wirken sich ebenfalls auf die Raumakustik aus. Seitliche Ränge verbessern die Verteilung der frühen Seitenreflexionen, da sie die für Schallausbreitung wirksame Raumbreite verringern. Der Große Musikvereinssaal ist z. B. 20 m breit, hat aber aufgrund der Seitenränge eine wirksame Saalbreite von 17 m. Balkone, Galerien und Ränge sollten nicht zu weit auskragen, da der Schalleinfall in die hinteren Sitzreihen der darunterliegenden Bereiche stark beschränkt wird. Als Faustregel ist deswegen eine Rangtiefe anzunehmen, die nicht größer als die ein- bis zweifache lichte Höhe des Ranges ist. Die Unterseiten von Rängen und deren Rückwände sollen durch Schrägstellung und optimale Oberflächenstruktur den Schall diffus in die hinteren Sitzreihen lenken. Mit denselben Maßnahmen sind störende Reflexionen an den Vorderseiten der Brüstungen zu vermeiden.

2.2.2.6 Schallschirm

Die meisten klanglichen Probleme, die in großen oder breiten Konzertsälen auftreten, können mit einem Schallschirm gelöst werden. Diese Maßnahme verbessert die Akustik und das Zusammenspiel auf der Bühne und füllt aufgrund der teilweisen Schalldurchlässigkeit den restlichen Saal noch mit ausreichend Schall und Nachhall. Abb. 45 zeigt einen Schallschirm, der den Klang der verschiedenen Instrumentengruppen gleichmäßig ins Publikum lenkt. Aufgrund der kürzeren Distanz über den Schirm als über die Decke sind die Reflexionen angemessen stark. Als schlechtes Beispiel zeigt Abb. 46 einen Saal, in dem die Streicher auf den vorderen und die Blechinstrumente auf den hinteren Publikumsbereich reflektiert werden. Die Balance des Orchesters ist dadurch sehr unausgewogen.

Die Oberfläche des Schallschirms sollte im Bühnenbereich den Schall streuen, wobei sich als Material am besten eine unregelmäßig strukturierte Gipsplatte oder aufgrund des leichteren Gewichtes eine Sperrholzrahmenkonstruktion eignet. Der Schirm sollte mindestens 3 cm dick und massiv sein, um Verluste in den tiefen Frequenzen zu vermeiden.

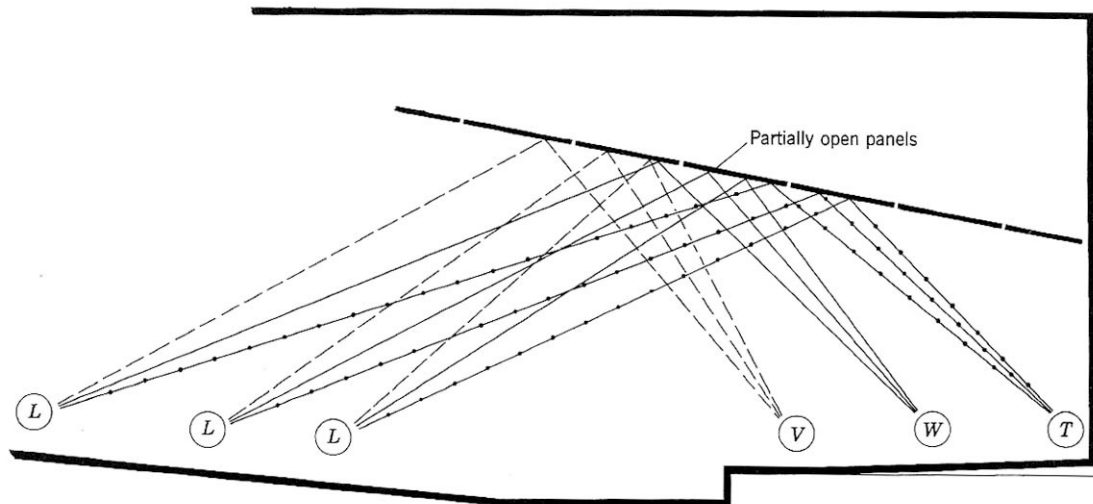


Abb. 45: Prinzipdarstellung eines optimalen Reflexionsverhaltens mit einem Schallschirm
(BERANEK, *Music, acoustics & architecture*, 1962, S. 500)

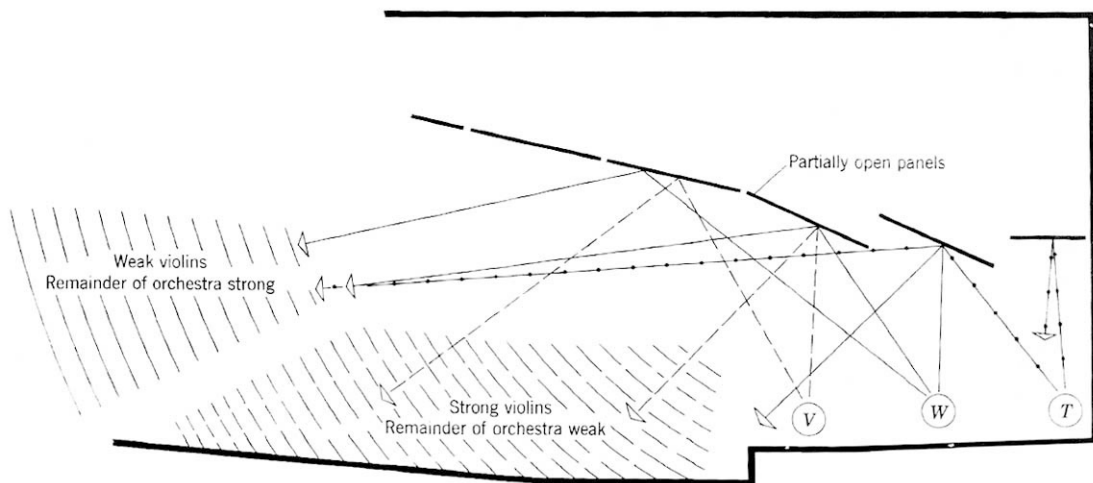


Abb. 46: Prinzipdarstellung eines schlechten Reflexionsverhaltens mit einem Schallschirm
(BERANEK, *Music, acoustics & architecture*, 1962, S. 501)

2.2.3 Ausführungsbeispiele

2.2.3.1 Sprechtheater

In einem Theater ohne Beschallungsanlage bestimmt die Stimmkraft der Schauspieler die maximale Publikumskapazität, die generell mit 1.000 Personen ihre Grenze erreicht. Bei einer Volumenkenzahl von etwas 4 bis 6 m³ pro Platz ergibt das ein maximales Raumvo-

lumen von etwa 6.000 m^3 . Der Frequenzlauf sollte möglichst linear sein und die Nachhallzeit optimalerweise 1,2 s nicht überschreiten⁵⁷. Die Bestuhlung sollte so gepolstert sein, dass die Schallabsorption des Publikumsbereichs im voll- und unbesetzten Zustand in etwa dieselbe ist.

2.2.3.2 Konzertsäle für sinfonische Konzerte

2.2.3.2.1 Schuhschachtelform und Bühnenkonstruktion

Bei einer Volumenkenzahl von 8 bis 12 m^3 pro Platz und einer gewünschten Nachhallzeit von 1,8 bis 2,0 s sollte das maximale Volumen von 25.000 m^3 nicht überschritten werden. Eine Publikumskapazität von unter 2.000 Personen ist anzustreben. Der Raum sollte schmal und hoch und nicht länger als 45 m sein. Einbauten wie Galerien, Balkone, Reliefs, Nischen und die Sekundärstruktur müssen durch diffuse Schallstreuungen und gezielte Reflexionen eine Ausgewogenheit von Durchsichtigkeit und Räumlichkeit erzeugen.

Wegen des üblichen ebenen Parketts sollte die **Bühne** angehoben sein. Idealerweise ist sie zusätzlich in einzelne Segmente je nach Instrumentengruppe unterteilt und gestuft, wie es z. B. beim Konzerthaus Berlin (siehe Abb. 47) zur Anwendung kommt, wo die Vorderbühne bis zum Parkett abgesenkt und die fünf in 1,4 m breite Streifen unterteilten Hauptpodien bis auf 1,5 m überhöht werden können.

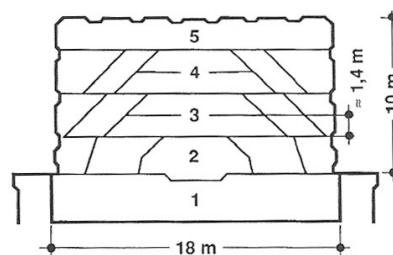


Abb. 47: Grundriss des Orchesterpodiums im Großen Saal des Berliner Konzerthauses: 1 Vorpodium, 2 bis 5 Hauptpodien
(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 200)

Die **Bühnenbreite** sollte bei einem Platzbedarf von $1,7$ bis $2,0 \text{ m}^2$ pro Musiker zwischen 18 und 20 m liegen, was bei einer mittleren Bühnentiefe von 11 m eine Gesamtfläche von etwa 200 m^2 bedeutet. Ist die Bühne zu breit, sitzen die Musiker zu weit auseinander, was ein gutes Zusammenspiel und eine ausgewogene Klangdurchmischung des Orchesters erschwert. Um auch die tiefen Frequenzen zu reflektieren, sollte der **Bühnenboden**

⁵⁷ Vgl. FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 188

möglichst massiv mit mindestens 40 kg/m^2 ausgeführt werden. Dafür eignet sich beispielsweise ein auf eine dicke Holzunterkonstruktion aufgeleimter Parkettboden. Die **Vorderbühne** muss ausreichend groß bemessen werden, um die auf den Boden gerichteten Schallabstrahlungen einiger Instrumente (Bläser, Streicher), vor allem aber die der Stimme zu reflektieren, weswegen der Sänger auch nie an der Bühnenvorderkante stehen sollten, da sich sonst die Stimme in den ersten Reihen verliert. **Bühnenwände** müssen ebenfalls mit einer flächenbezogenen Masse von 40 kg/m^2 bemessen werden, um ihre raumakustische Wirkung möglichst breitbandig auszuüben. Sie dienen dazu, die frühen Reflexionen in das Auditorium zu lenken und ebenfalls Durchmischung und Zusammenspiel zu unterstützen, wobei Teile der strukturierten Flächen den Schall diffus auf das Orchester zurückwerfen müssen. Idealerweise weisen die Bühnenseitenwände einen Öffnungswinkel von etwa 15° auf, um auch die vorderen seitlichen Plätze mit ausreichend frühen Reflexionen zu versorgen. Der **Abstand der ersten Reihe** vom vorderen Bühnenrand sollte mindestens 4 m betragen, da der Gesamtklang aufgrund der Nähe zu einer bestimmten Instrumentengruppe unausgewogen ist⁵⁸.

2.2.3.2.2 Andere Grundformen

Einer der wenigen Nachteile von rechteckigen Konzertsälen ist die schlechte Sicht auf die Bühne von den letzten Reihen, besonders bei großen Konzertsälen, die länger als 45 m sind und mehr als 2.000 Personen fassen müssen. Bauten mit alternativen Grundformen erlauben meist bessere Sichtverhältnisse, haben aber mit anderen raumakustischen Problemen zu kämpfen. Bereits beschriebene Beispiele sind:

- **Salle Pleyel** in Paris als Trapezform: unerwünschte Schallbündelungen durch konkave Decke und nachhallarm.
- **Royal Festival Hall** in London als breite Rechteckform: mangelnde Räumlichkeit und nachhallarm.

Zu den Konzertsälen, die trotz abweichender Form eine mit den Rechtecksälen vergleichbare gute Raumakustik aufweisen, zählen z. B. die **Berliner Philharmonie** und **das Neue Gewandhaus in Leipzig**. Bei beiden Gebäuden kompensieren Trennwandflächen zwischen den einzelnen Publikumsabschnitten die fehlenden Seitenreflexionen. In den meisten Konzertsälen werden heutzutage tieffrequente Schallabsorber eingesetzt, die sich aber keinesfalls in Bühnennähe befinden sollten, da hier die breitbandige Schallausbreitung nicht behindert werden soll.

⁵⁸ Vgl. FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 201f

2.2.3.3 Kammermusiksäle

Grundsätzlich entsprechen die raumakustischen Anforderungen der Säle für Kammermusik denen der großen Konzertsäle, wobei im Speziellen auf die geringere Schallleistung der Solisten oder der kleineren Ensembles eingegangen werden muss. Kammermusik an sich verlangt nach einer höheren **Intimität**. Die Nähe zur künstlerischen Darbietung wird durch die Raumgröße und Nachhallzeit bestimmt, weswegen die Publikumskapazität zwischen 200 und 1.000 Personen liegen sollte. Bei einer Volumenkenzahl von 6 bis 10 m^3 pro Platz ergibt das ein wünschenswertes Raumvolumen von maximal 10.000 m^3 . Die mittlere Nachhallzeit sollte bei 1,3 bis 1,6 s liegen, was auch der empfohlenen Nachhallzeit für Mehrzwecksäle entspricht (siehe Abb. 35). Deswegen werden Kammermusiksäle oft als Ergänzung zu einem großen Konzertsaal und für verschiedene Nutzungen geplant. Weitere raumakustische Qualitäten sind hohe **Durchsichtigkeit** (Klarheitsmaß von 2 bis 3 dB) und niedriger **Raumeindruck** (Seitenschallgrad von 25 bis 30 %), was bedeutet, dass für die Klanggüte die Ausbildung der frühen Reflexionen wichtiger als die seitlichen Reflexionen ist⁵⁹.

Die **Bühne** sollte etwa 50 m^2 groß sein. Aufgrund der geforderten Klarheit solcher Säle spielt die Richtcharakteristik der Soloinstrumente und Gesangsstimmen eine tragende Rolle bei der Platzierung des Publikumsbereichs. Der Zuhörer sollte möglichst vor der Bühne in Hauptabstrahlrichtung der Instrumente positioniert sein. Seitliche Sitzbereich oder Plätze hinter der Bühne sind eher zu vermeiden, da hier Unausgewogenheiten des Ensembleklangs wesentlich deutlicher als im großen Konzertsaal ausfallen.

2.3 Zusammenfassung

Mit Wallace Sabines Formel zur Berechnung der Nachhallzeit in Jahr 1896 schienen alle akustischen Geheimnisse der vergangenen Jahrhunderte gelüftet zu sein. Zuvor wurde die Akustik als naturwissenschaftliche Disziplin recht stiefmütterlich betrachtet, was sich immer wieder am mangelnden Stellenwert selbst bei Entwürfen von Aufführungsstätten für Musik oder Sprache zeigte. Diese Auffassung änderte sich zwar im Laufe des 20. Jahrhunderts, wo man glaubte, die Lösung für alle akustischen Mängel gefunden zu haben, nur um mit den Direktschall-Sälen und HiFi-Konzertsälen abermals zu scheitern.

Auch heute noch haftet der Raumakustik eine gewisse Unfassbarkeit an, was zum Teil darin begründet ist, dass die Beurteilung von raumakustischen Eigenschaften ein sehr emotionaler und äußerst subjektiver Vorgang ist. Derselbe Konzertsaal kann bei Musiker und Zuhörer unterschiedliche Impressionen hervorrufen. Technische Messungen und

⁵⁹ Vgl. FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 206

raumakustische Berechnungen geben somit keine vollständige Auskunft über die emotionale Qualität einer Aufführungsstätte, weisen aber zumindest die planerischen Grenzen auf und setzen Tendenzen. Die ideale Aufführungsstätte soll die geeignete Hülle für den Ausdrucksumfang der verschiedenen künstlerischen Darbietungsformen bilden, eine reibungslose Aufführung ermöglichen (z.B. durch Infrastruktur und Erschließung) und darf sich nicht aufdrängen (z.B. durch akustische Mängel oder schlechte Akustik).

In diesem Sinne sollen auch die hier beschriebenen Grundlagen auf dem Gebiet der Raumakustik und die technischen Ausführungen verstanden werden, denen neben den architektonischen Aspekten dieselbe Relevanz für den Entwurf zugesprochen werden muss.

3 Entwurf eines Kulturzentrums für Musik und Theater in Wiener Neudorf

Nachdem mit den ersten beiden Kapiteln eine theoretische Grundlage für den Entwurf geschaffen wurde, erfolgen in diesem Kapitel die Beschreibung des realen Standortes, an dem der Entwurf entstehen soll, die Vorstellung des Raumprogramms und erste raumakustische Bemessungen. Die hier angeführten Methoden sind nur als annähernde Berechnungen zu verstehen, da die exakte Berechnung der Nachhallzeit unter Berücksichtigung aller relevanten Faktoren relativ kompliziert ist und nur mit speziellen Modellmessverfahren und Computersimulationen durchgeführt werden kann. Doch zur Abschätzung von Raumvolumen, Materialien und Notwendigkeit von Schallabsorbern sind diese Methoden durchaus geeignet.

3.1 Standort und Geschichte der Gemeinde

Wiener Neudorf ist eine Stadt im Wiener Becken 10 km südlich von Wien und erstreckt sich über 6 km². Sie zählt 8.781 Einwohner (Stand 2009; zum Vergleich: 1971 wurden 4.072 Einwohner gezählt⁶⁰) und befindet sich im niederösterreichischen Bezirk Mödling.

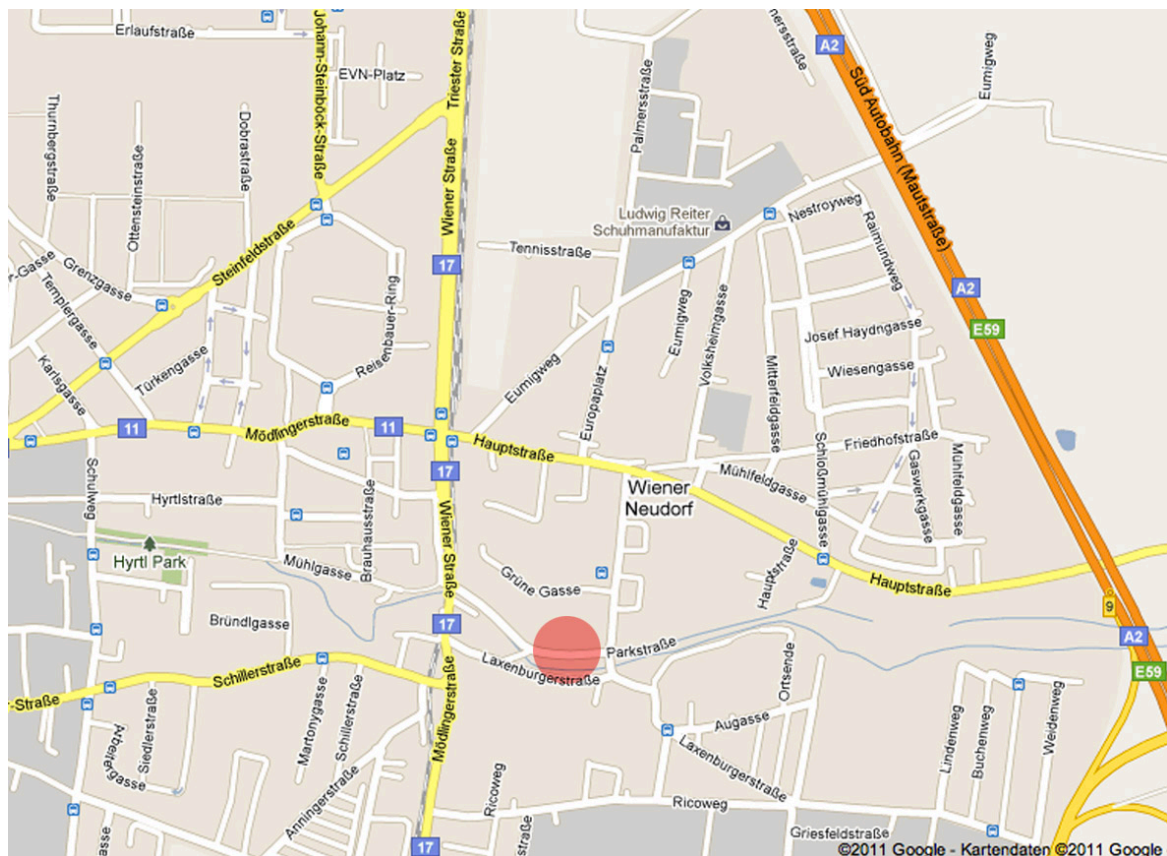


Abb. 48: Wiener Neudorf mit Entwurfsareal (rot markiert)
(<http://maps.google.at/>, 09.04.2011, 20:13)

⁶⁰ Statistik Austria, <http://www.statistik.at/blickgem/gemDetail.do?gemnr=31725>, 17.02.2011, 12:28

Im 11. Jahrhundert residierte eine Nebenlinie der Babenberger auf Burg Mödling, wobei ein Teil ihrer Gefolgschaft in Neudorf lebte, das damals noch Nuendorf, Niuwendorf, Neuendorf, Nowendorf und ähnlich genannt wurde. Im 12. und 13. Jahrhundert kam es zu den ersten urkundlichen Erwähnungen von Neudorf, das mittlerweile zum Angerdorf auf beiden Seiten des Mödlingbaches gewachsen war. 1231 ist der erste Richter von Neudorf, iudice de Niwendorf, nachweisbar. 1244 wurde die Neudorfer Mautstelle an der jetzigen Triester Straße eingerichtet. Die Einnahmen über den Fernverkehr förderten die Entwicklung des Ortes, dennoch blieb Neudorf bis ins späte 19. Jahrhundert ein Bauerndorf. Der Weinbau hatte seine Hochzeit im 14. bis 16. Jahrhundert.

1441 wurde die erste Kapelle errichtet, für die seit 1493 der Name „Sannd Wolfgang Capellen“ nachweisbar ist. Im 15. Jahrhundert befand sich außerdem ein schlossähnliche Burganlage in Neudorf, die ihren Ursprung vermutlich schon im 12. Jahrhundert hatte, aber aufgrund von Kriegen, unter anderem zwischen verfeindeten Brüdern des Hauses Habsburg, und Angriffen von Ungarn und Türken über die Jahrhunderte verödete. 1633 wurde das Schloss mit der dazugehörigen Herrschaft von der Erzdiözese Wien erworben. 1683 wurden die Türken erfolgreich abgewehrt und das durch Zerstörung und Pest heimgesuchte und zerrüttete Neudorf wieder aufgebaut. Als Zeichen und Mahnmale an die großen Ereignisse der letzten Jahrhunderte wurden die Dreifaltigkeitskapelle, das Türkenkreuz und die Mariensäule errichtet.

Um 1700 nahmen die ersten Ziegelwerke ihren Betrieb auf, um das in der Gegend reichlich vorhandene Rohmaterial zu verarbeiten. Bis Anfang des 20. Jahrhunderts bestanden die Wiener Neudorfer Ziegelwerke aus dem Gemeindeziegelofen, dem Herrschaftsziegelofen, dem Ziegelwerk „Oberes Bergfeld“, den Griesfelder Ziegelwerken und der Neudorf-Guntramsdorfer Ziegelfabrik. 1750 wurde der alte Kirchturm (heute der alte Rathausturm) erheblich erhöht und gilt seitdem als Wahrzeichen des Ortes. 1780 wechselte der Gottesdienst in die heutige Pfarrkirche Maria Schnee, woraufhin die alte Sankt-Wolfgang-Kapelle als provisorischer Unterrichtsraum verwendet wurde. 1769 entstand die „Austria“-Brauerei, die noch bis in 20. Jahrhundert ortsprägend war, bis sie bei einem Brand zerstört wurde. Ab 1784 gab es eine eigene Poststation. Das Postwesen Anfang des 19. Jahrhunderts verhalf Wiener Neudorf schließlich zu seinem jetzigen Namen. Zur besseren Unterscheidung der namensgleichen Orte bekamen diese Zusätze wie „Neudorf bei Staatz“ oder „Neudorf bei Pöggstall“. Wiener Neudorf wurde anfangs W. Neudorf genannt, bis es sich immer mehr einbürgerte und 1954 offiziell anerkannt wurde.

Gegen Ende des 18. Jahrhunderts zählte Neudorf ca. 900 Einwohner und 100 Häuser. Es gab zehn Betriebe, einen „Chirurgus“ und eine Hebamme. Im Zuge der Revolutionen in den Jahren 1848/49 wurde Neudorf eine selbständige Ortsgemeinde und ihre Grundherr-

schaft beendet. 1853 ließ Kaiser Franz Joseph im bis dahin im Besitz der Diözese Wien befindlichen Schloss eine Frauenstrafanstalt errichten. Die Kongregation der Schwestern vom Guten Hirten war für die Führung der Anstalt verantwortlich, die bis 1938 mehr als 11.000 weibliche Sträflinge betreute. 1872 wurde die Freiwillige Feuerwehr in Neudorf gegründet, die seitdem ihren Platz in der Parkstraße hatte, gegenüber der Volksschule, deren Errichtung 1875 beendet wurde. Seit 1886 fährt die Badner Bahn durch Neudorf. Nach stockender Entwicklung während des Ersten Weltkrieges wurde in der Zwischenkriegszeit unter Bürgermeister Karl Reisenbauer das Straßennetz ausgebaut. Arbeiten an den Wasserleitungsanschlüssen, der Kanalisierung und der Mödlingbachregulierung wurden fortgesetzt. Weiters wurde 1925 der elektrische Strom eingeführt.

1935 wurde die Gemeinnützige Bau-, Wohnungs- und Siedlungsgenossenschaft gegründet, welche in dieser Zeit für billige Wohnmöglichkeiten sorgten. Der Großteil der Einwohner war arbeitslos. So mussten auch die Beschäftigten der Brauerei, welche zur Jahrhundertwende noch wirtschaftlichen Gewinn einfuhr, um ihre Arbeitsplätze fürchten. Im März 1938 erfolgte der Anschluss an Deutschland, und deutsche Truppen marschierten in Wiener Neudorf ein. Die mittlerweile stillgelegte Brauerei wurde die neue Herberge für den Heereskraftpark des Panzerregiments 3 mit 200 Soldaten. Wiener Neudorf gehörte nun als Randgemeinde zu Groß-Wien und wurde erst 1954 wieder eine eigenständige niederösterreichische Gemeinde. Bis zum Ende des Zweiten Weltkrieges war Wiener Neudorf ein oft anvisiertes Ziel für Bombenangriffe. Grund dafür waren die „Flugmotorenwerke Ostmark“ (F.O.), deren Errichtung 1940 begann. In der Nähe der Werke wurde das Konzentrationslager Wiener Neudorf, ein Nebenlager von Mauthausen, aufgebaut, dessen Insassen zur Arbeit in den Werken gezwungen wurden.

Nach Kriegsende konnte unter russischer Besatzung nur spärlich mit dem Wiederaufbau begonnen werden. 80 Prozent der Häuser waren beschädigt, dennoch wurde zu diesem Zeitpunkt der Wandel von einer landwirtschaftlich orientierten Gemeinde zu einer Industriegemeinde eingeläutet. 1951 wurde das Kloster den Schwestern vom Guten Hirten zurückgegeben, wo von nun an vor allem Kleinkinder und erziehungsbedürftige Jugendliche Betreuung erfuhren. Der Wohnungsnot wurde mit den Siedlungen „Frieden“ ab 1950 und den Gemeindewohnungen Gartengasse ab 1955 entgegengewirkt, und gegen Ende der Fünfzigerjahre konzentrierte sich die Gemeinde darauf, neue Industriebetriebe anzusiedeln. Zu diesem Zwecke eignete sich das zerstörte, 280 Hektar große Areal der ehemaligen Flugmotorenwerke besonders gut. Das sogenannte „Industriezentrum Niederösterreich Süd“ zählte im Jahr 2007 etwa 280 nationale und internationale Unternehmen, die um die 10.800 Mitarbeiter beschäftigten. 1967 wurde die neue Volksschule und 1976 das neue Rathaus eröffnet. Das frühere Klosterareal wurde von der Gemeinde

Wiener Neudorf wiedererworben und schließlich zur Unterbringung eines Gendarmeriepostens, einer Rettungsstelle und des Christoph-Migazzi-Hauses genutzt, wo sich unter anderem die Musikschule und das Gemeindearchiv befinden.

3.2 Die Alte Volksschule und die Alte Feuerwehr am Angerplatz

Die Alte Volksschule und die Alte Feuerwehr, die den Bestand für den Entwurf bilden, befinden sich in der heutigen Parkstraße. An dieser Stelle am Mödlingbach befand sich der frühere Dorfanger, ein zentraler Ort im Leben der Gemeindemitglieder.



Abb. 49: Alte Volksschule, Frontfassade (Juni 2009)

Von 1780 bis 1874 fand der Schulunterricht in der St.Wolfgangs-Kirche statt und zog aus Platzmangel 1875 in die Alte Volksschule am Angerplatz, wo nun drei Schulklassen Platz fanden. Dieser zweigeschoßige, verputzte Ziegelbau mit Giebelbedachung weist einen typischen Hofgrundriss auf, der die hiesige landwirtschaftliche Tradition wiedergibt und den angrenzenden Bauten derselben Bauperiode entspricht. 1895 wurde die Alte Volksschule um den hinteren Nordtrakt mit vier weiteren Schulklassen erweitert. 1967 zog der Schulbetrieb in einen modernen Schulbau am Europaplatz. Heute werden die Räumlichkeiten von der Gemeinde an diverse Vereine als Versammlungs- oder Probe-räume vermietet. Im vorderen Teil des Hauses befinden sich Wohnungen und eine Arztpraxis.



Abb. 50: Alte Volksschule, Nordtrakt mit Seitentrakt, Rückseite mit Durchgang (Juni 2009)

Die in den 1870er-Jahren gegründete Feuerwehr errichtete 1875 ein einfaches eingeschößiges Zeughaus mit quadratischem Grundriss am Angerplatz gegenüber von der Schule. Diese zentrale Lage ermöglichte es den Feuerwehrleuten, in kürzester Zeit zu den Brandstätten zu gelangen. 1938 wurde das Zeughaus um einen kleinen Schlauchturm erweitert. Mit der Motorisierungswelle in den 1950er-Jahren wurde der Beschluss für ein neues Feuerwehrhaus gefasst, das am 18. August 1973 seine Eröffnung feierte.



Abb. 51: Alte Feuerwehr (Juni 2009)

Die Alte Feuerwehr ist ein eingeschößiger, utilitärer Industriebau aus Stahlbeton mit Außenverputz, der eine Kommandozentrale, einen Gemeinschaftsbereich, Umkleideräume und eine große Einstellhalle aufweist. 1982 wurde aufgrund des steigenden Platzbedarfs der mittlerweile 78 Mann fassenden Mannschaft ein zweigeschößiger Zubau realisiert, in dem sich ein großer Schulungsraum im Obergeschoß, eine weitere Einstellhalle, eine Waschbox und Lagerräume befinden. Um den heutigen Sicherheitsstandards

zu entsprechen, zog die Feuerwehr im Herbst 2009 in das neue Feuerwehrhaus, das nun wieder im Besitz eines Schlauchturms ist, wenige Meter südlich von der Alten Feuerwehr am Rande des Industriezentrums Niederösterreich Süd.



Abb. 52: Alte Feuerwehr, Panorama (Juni 2009)



Abb. 53: Alte Feuerwehr, Zubau von 1982 (Juni 2009)

3.3 Konzept

Eine grundsätzliche Schwierigkeit stellt die Umnutzung und Ergänzung von zwei bestehenden Gebäuden aus verschiedenen Bauperioden zu einem einzigen einheitlichen Entwurf dar, wobei angemerkt werden muss, dass die Alte Volksschule einen schützenswerteren Charakter aufweist als die Alte Feuerwehr. Dies liegt einerseits an der älteren Geschichte des Schulgebäudes – im Gegensatz zum Industriebaucharakter der Alten

Feuerwehr – und andererseits an der direkten Eingliederung in die angrenzenden Nachbarbauten aus derselben Bauperiode. Die Alte Feuerwehr steht dieser ehemaligen Hofreihung, die jetzt hauptsächlich für Wohnungen verwendet wird, als Solitär aus einer späteren Zeit etwas fremdlich gegenüber. Um bei diesem Entwurf trotz der unterschiedlichen Bauperioden ein einheitliches Bild zu erzeugen, wird hier mit dem Prinzip der Überstülpung gearbeitet.

Diese Gegebenheit äußert sich im Ausmaß des planerischen Eingriffs. Während bei der Alten Volksschule lediglich ein ebenerdiger Seitentrakt entfernt, die Dachfläche des hinteren Gebäudes modifiziert wird (Abb. 54) und es insgesamt um einen neuen Baukörper ergänzt wird (Abb. 55), der den vorderen und hinteren Teil des Bestandes miteinander verbindet, sind bei der Alten Feuerwehr mehrere Vorkehrungen nötig.

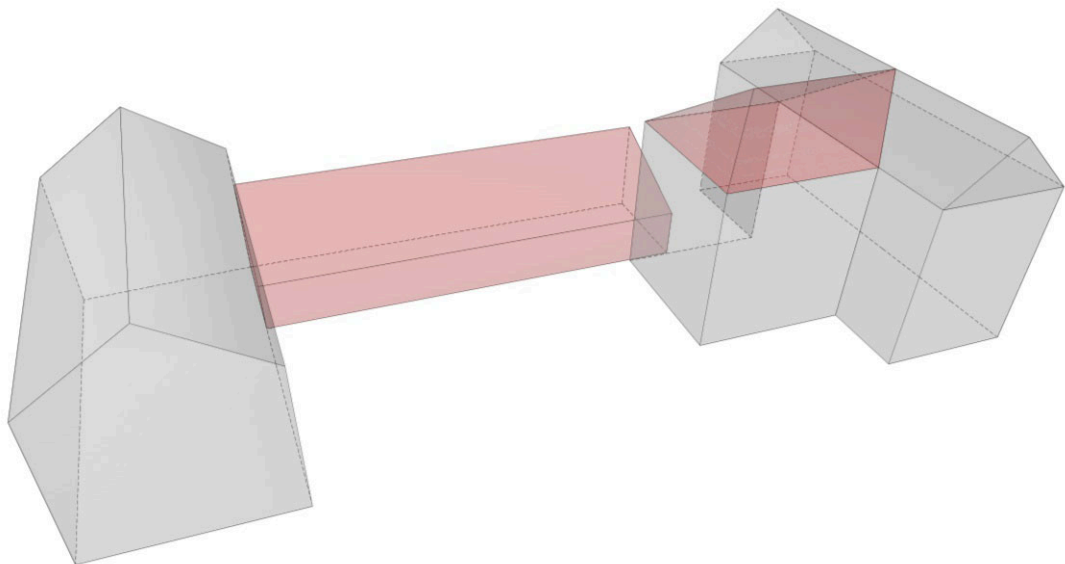


Abb. 54: Alte Volksschule, Abriss in rot

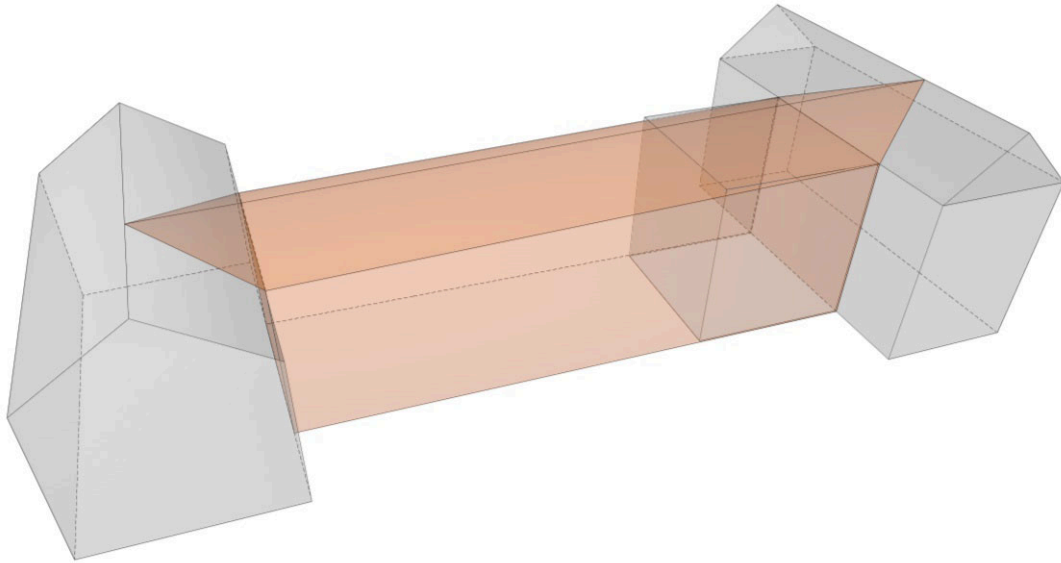


Abb. 55: Alte Volksschule, neuer Baukörper in orange

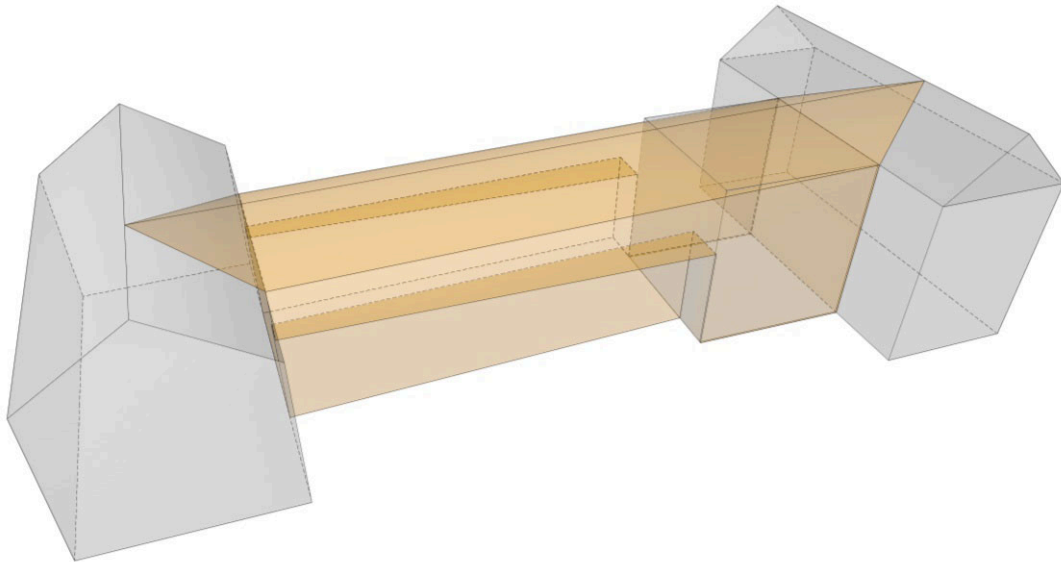


Abb. 56: Alte Volksschule, endgültige Form in gelb

Die L-förmige ebenerdige Kommandozentral wird bis auf das Wandmosaik gänzlich entfernt und dient als Parkplatz und Lieferzufahrt (Abb. 57). Die Einstellhalle muss erhöht werden, um den raumakustische Anforderungen eines Mehrzwecksaals gerecht zu werden, der zweigeschoßige Zubau wird ebenso ausgebaut (Abb. 58) und mit einem weiteren Baukörper ergänzt, um das üppige Raumprogramm zu erfüllen (Abb. 59).

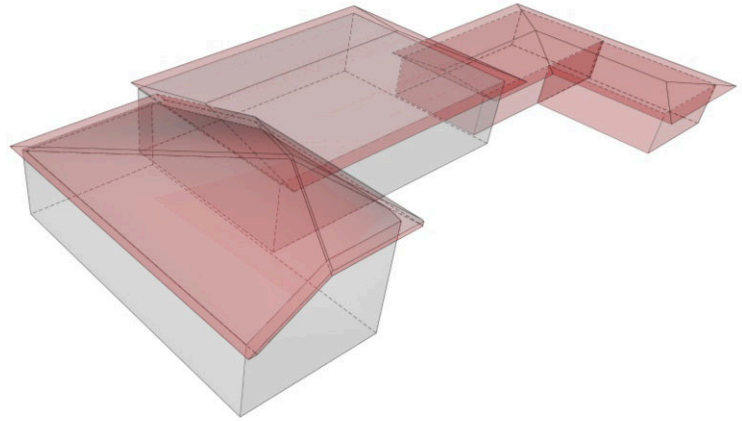


Abb. 57: Alte Feuerwehr, Abriss in rot

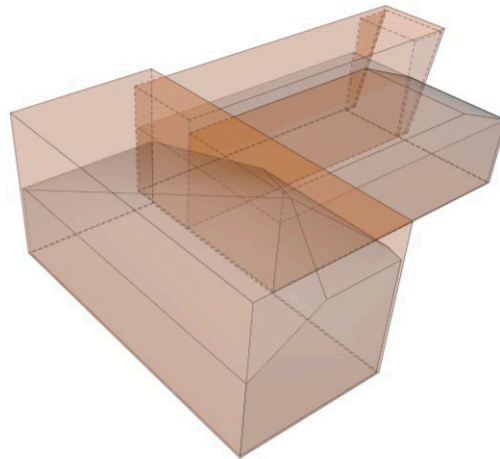


Abb. 58: Alte Feuerwehr, Überstülpungen in orange

Trotz der Überstülpungen soll die Form der neuen Baukörper die Funktionen im Inneren preisgeben. So schiebt sich bei der Alten Volksschule der Theatersaal aus der Achse des neuen Baukörpers, bleibt in der Flucht des vorderen Gebäudes und bietet somit zusätzlich Platz für eine westseitige Terrasse für die Räume im obersten Geschoß (Abb. 56). Auf der Seite des Durchgangs befinden sich durch die Verschiebung die Rampe und die Treppe in einem von Witterungen geschützteren Bereich als zuvor.

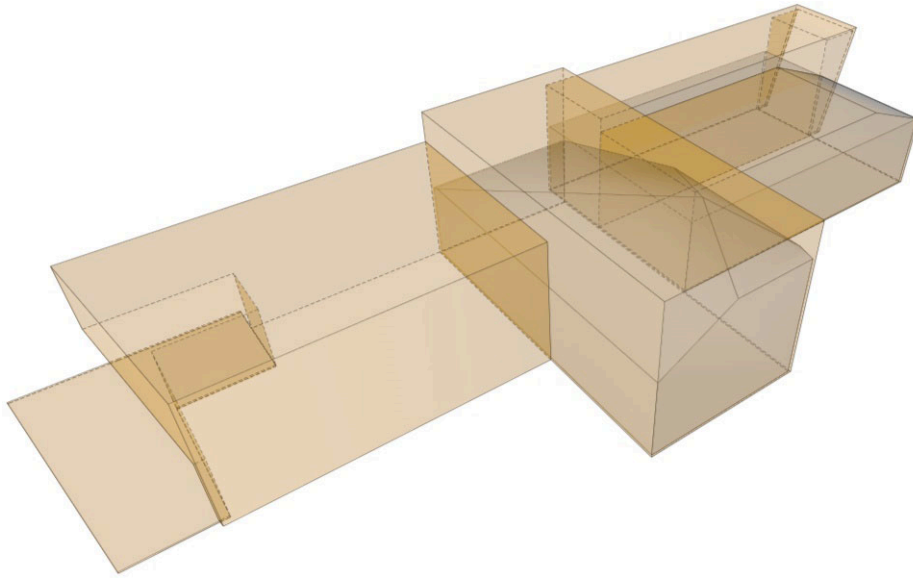


Abb. 59: Alte Feuerwehr, endgültige Form in gelb

Beim behutsamen Umgang mit dem Bestand der Volksschule wird die Grundstruktur großteils übernommen. Es werden hauptsächlich nichttragende Zwischenwände aus Gründen der Raumaufteilung bzw. zur Installation einer Aufzugsanlage entfernt bzw. tragende Wände durchbrochen. Die Frontfassade bleibt bis auf den neuen überdachten Eingang unverändert und wird um einen seitlichen Durchgang ergänzt. Das ursprüngliche Erscheinungsbild soll erhalten bleiben und gegebenenfalls nur kosmetisch ausgebessert werden, um das Gebäude nicht zu sehr aus dem geschichtlichen Kontext zu reißen. Von der Parkstraße aus ist der neue Baukörper im Hof kaum sichtbar und ordnet sich so dem Bestand unter.

Die kleinteiligen und verschachtelten Innereien der Alten Feuerwehr werden komplett entfernt, um eine den Anforderungen entsprechende großzügigere Planung zu ermöglichen. In diesem Fall ordnet sich der Bestand unter und bildet wortwörtlich den Sockel für die übergestülpten Geschoßerweiterungen. Der Konzertsaal zeigt sich nach außen durch eine für akustische Zwecke nützliche, abgeschrägte Dachfläche im Bühnenbereich und das neue Foyer erhebt sich als höchster Baukörper über Konzertsaal, Künstlerbereich und Café. Die Erscheinung der Foyer-Glasfassade bezieht sich auf den alten Zubau, der durch seine eigenwillige Walmdachform einen Wiedererkennungswert der Alten Feuerwehr darstellt. Auch die Fassaden und Walmdächer werden gänzlich neugestaltet.

Die neuen Baukörper erhalten über dem Betonmauerwerk eine einheitliche hinterlüftete Fassadenschalung aus beschichteten Laminatplatten, um die Übergänge von Altbau zu Neubau (z.B. bei der Erhöhung der Einstellhalle bei der Alten Feuerwehr) optisch zu verschleiern und die Witterungsbeständigkeit zu verbessern. Die Schalung erfolgt über Wand- und Dachflächen und verleiht vor allem der Alten Feuerwehr eine dezente

Erscheinung, die nicht mit der vorhandenen Strukturen vorort konkurriert. Die Vereinheitlichung der neuen Baukörper erfolgt hauptsächlich durch die Materialwahl und das einheitliche Erscheinungsbild. Die Laminatplatten verleihen den Fassaden eine feine Struktur und geben das Raster für die wenigen Fenster- und Türöffnungen vor.

3.4 Raumprogramm

Die Funktionen werden je nach Schwerpunkt (Theater oder Musik) auf die Alte Volksschule oder die Alte Feuerwehr aufgeteilt. Neben der Mehrfachbenutzbarkeit der beiden Hauptsäle soll das Kulturzentrum auch ausreichend Platz für Probe- und Vereinsräume bieten sowie ein Café-Restaurant, das unabhängig vom Spielplan geführt wird, und flexible Räumlichkeiten für wechselnde Sonderausstellungen oder sonstige Vermietzwecke beinhalten. Alle öffentlichen Bereiche sind barrierefrei zugänglich.

3.4.1 Alte Volksschule – Schwerpunkt Theater

- großzügiger Foyerbereich mit Kassapult und Garderobe, benutzbaren Terrassenbereich und Möglichkeit zu einer kleinen Verköstigung während der Spielpause
- Mehrzwecksaal für Theateraufführungen und sonstige Sprachveranstaltungen (wie z.B. Seminare, Vorträge, Konferenzen) mit 143 Sitzplätzen
- großzügige Hinterbühne mit Stauraum für Bühnenequipment und Sitze
- drei Proberäume für Musik (z.B. für heimische Bands) oder Sprechproben
- Büro für den Theaterverein
- drei weitere Gruppenräume für z.B. Jugend-, Näh- und Kunstverein
- zwei Künstlergarderoben bzw. Backstageräume
- zwei Künstlerwohnungen als Maisonette mit Terrasse für Übernachtungen von Auswärtigen
- unüberdachter, privater Hofbereich für kleinere Veranstaltungen und Freiluftaufführungen

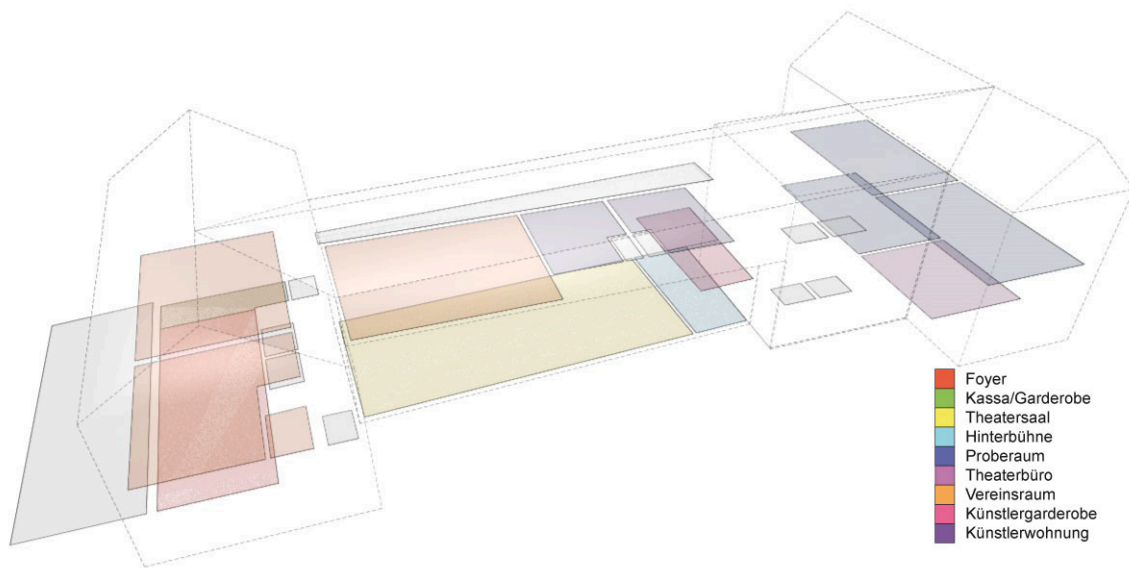


Abb. 60: Alte Volksschule, Raumprogramm

3.4.2 Alte Feuerwehr – Schwerpunkt Musik

- großer Foyerbereich mit Kassapult und Garderobe
- Mehrzwecksaal für Musikveranstaltungen mit 150 Sitzplätzen
- großzügige Hinterbühne mit Stauraum für Bühnenequipment
- zwei Proberäume zum Warmspielen vor Konzerten
- Café-Restaurant mit kleiner Bühne und Terrasse Richtung Süd-Osten
- ein offener und drei geschlossene Räumlichkeiten zum Vermieten
- drei Künstlergarderoben und Lagerräume für Noten, Instrumente, Kostüme etc.

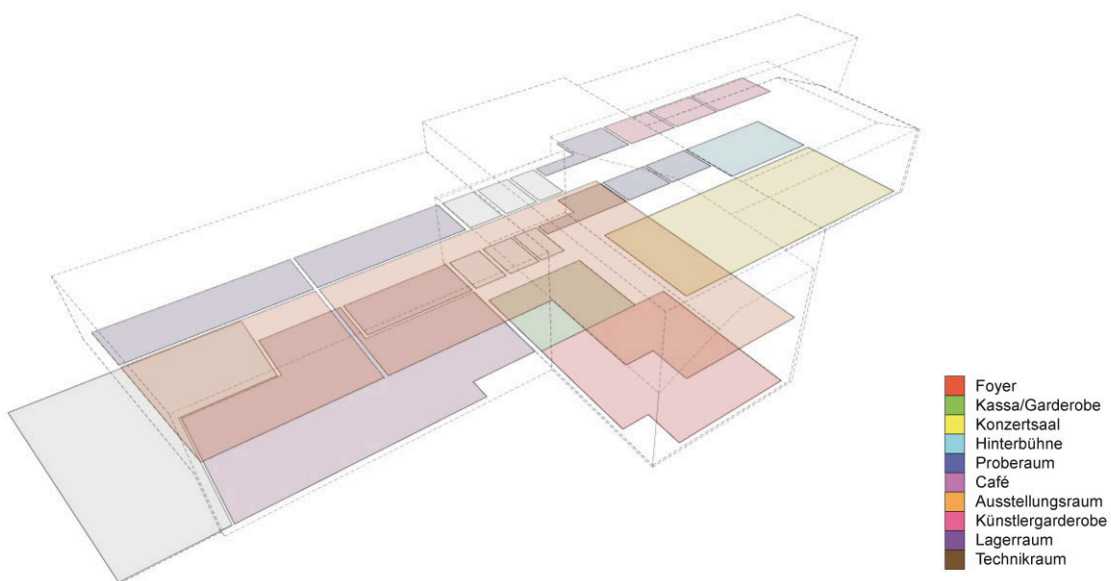


Abb. 61: Alte Feuerwehr, Raumprogramm

3.5 Erschließung und Funktion

3.5.1 Alte Volksschule

Über die Stufen bzw. die Rampe erreicht man die Terrasse, die zum überdachten Haupteingang führt und im Sommer als erweiterte Pausenfläche zum Verweilen einlädt. Im Foyer befinden sich Kassa und Garderobe, ein zusätzlicher Stauraum und im Anschluss die WC-Anlagen und der Ausgang zum begrünten halbprivaten Hof, der am neuen Baukörper entlang zum hinteren Gebäudeteil führt. In der Achse des Haupteingangs gelangt man direkt in den Hauptsaal.

Aufgrund der räumlichen und akustischen Anforderungen befindet sich der Saal im ehemaligen Hof, da weder im vorderen noch im hinteren Bestand ausreichend Platz wäre. Die Rechteckform ermöglicht eine leichte Anpassung an den aktuellen Verwendungszweck bei größtmöglicher Platznutzung. Der Saal ist mit einem ebenen Parkettboden und strukturiert verputzten Wänden ausgestattet. An den Seitenwänden befinden sich auf Publikumshöhe Helmholtzresonatoren hinter den Verblendungen und die Bühnenwände sind mit schweren Holzpaneelen verschalt, um den Schall möglichst gut in den Saal zu reflektieren. Die Bühne aus modularen Bühnenelementen kann bei Bedarf ebenso wie die Bestuhlung verstaut werden, um Platz für größere Veranstaltungen zu schaffen.

Rechts neben dem Haupteingang befindet sich ein Durchgang, der sowohl zum separaten Aufzug und zur Außentreppe für die Erschließung des ersten Stockes des Vordergebäudes, wo sich zwei Vereinsräume befinden, und weiter zum öffentlich zugänglichen Durchgangshof führt. Von da aus gelangt man entweder über die Außenrampe zum Eingang des hinteren Gebäudeteils oder kann das Grundstück Richtung Norden verlassen. Im Erdgeschoß des Hinterhauses befinden sich neben den WC-Anlagen das Theaterbüro und ein Proberaum, direkt über diesen Räumen zwei weitere Proberäume. Über das Stiegenhaus oder mit dem Lift gelangt man zu den Halbstöcken, wo sich Hinterbühne, direkt darüber zwei Künstlergarderoben und noch eine Etage höher zwei Künstlerwohnungen sowie ein weiterer Vereinsraum befinden, die sich eine große Terrassenfläche Richtung Westen teilen.

3.5.2 Alte Feuerwehr

Der Eingang befindet sich im neuen Baukörper und führt über einen Windfang entweder zum Foyer oder zum Café-Restaurant, der unabhängig vom Konzertbetrieb geführt. Neben der Bar und dem geschlossenen Küchenbereich gibt es eine kleine Bühne für intimere Veranstaltungen und Konzertauftritte mit geringer Besucherkapazität. Die Terrasse am Bach mit Blick auf den Park lädt zum Verweilen ein. Im Café gibt es eine fix

installierte Bestuhlung und den Platz für weitere Tische und Sessel, die je nachdem, ob ein Sitz- oder Stehkoncert stattfindet, ins Lager geräumt werden können. Links an der Bühne vorbei gelangt man zu den WC-Anlagen, die mit Konzertbetrieb geteilt werden. Im Foyer befinden sich Kassa mit Garderobe und der Zugang zum Hauptsaal.

Im Gegensatz zur Alten Volksschule bietet die bestehende Einstellhalle eine gute Grundstruktur für den Hauptsaal. Nur das Raumvolumen muss mit der Decke vergrößert werden, um die optimale Nachhallzeit für einen Mehrzwecksaal zu erreichen. Der rechteckige Grundriss ergibt sich aus den Gegebenheiten und ist nebenbei ideal für diese Zwecke. Der Parkettboden ist eben und die Wände sind mit Holzplatten als Sekundärstruktur verblendet, die einerseits für kräftige seitliche Reflexionen sorgen und andererseits den Schall ausreichend brechen und zerstreuen. Die Bühne besteht aus schweren, großformatigen Holzpaneelen und die an den Stirnseiten abgeschrägte Decke besitzt eine Vorsatzschale aus Laminatplatten, in der je nach Bedarf Schallabsorber eingebracht werden können.

Vom Foyer aus gelangt man ebenso zum Lagerraum, zu den Proberäumen, wo sich die Musiker einspielen können, und zum Hinterbühnenbereich. Im Foyer und Hinterbühnenbereich gelangt man über eine offene Stiege, eine Wendeltreppe oder mit dem Lift ins Obergeschoß. Hier befinden sich in der ehemaligen Einstellhalle die Künstlergarderoben, Lagerräume und WC-Anlagen. Im neuen Trakt gibt es einen großen offenen und drei geschlossene Räumlichkeiten, die für verschiedene Anlässe wie Ausstellungen, Seminare oder Vereinstreffen vermietet werden können. Die freie Raumaufteilung erlaubt eine individuelle und vielseitige Nutzung.

3.6 Berechnung der Nachhallzeit und raumakustische Maßnahmen

Die Nachhallzeit von Auditorien wird vor allem von den Publikumsabsorptionen bestimmt, weswegen ein gewisses Mindestvolumen vorhanden sein muss, um eine angestrebte Nachhallzeit zu erreichen. Dies lässt sich überschlagsmäßig mit der **Volumenkennzahl K** bestimmen, wobei der Minimalwert kritischer als der Maximalwert ist. Weitere schallabsorbierende Maßnahmen können noch immer zu einem späteren Zeitpunkt eingeplant werden, wogegen sich die Nachhallzeit nur schwer durch bauliche Maßnahmen künstlich verlängern lässt. In diesem Fall müsste der Nachhall elektroakustisch mit einer Beschallungsanlage verstärkt werden. Die Angabe eines maximalen Volumens soll einem mangelnden Schalldruckpegel in einem zu großen Saal vorbeugen, wo Sprecher oder Musiker in der letzten Zuhörerreihe nur noch schwer zu verstehen oder zu leise sind. Bei Mehrzwecksälen für Musik und Sprache ist die Volumenkennzahl K $4 - 7 \text{ m}^3/\text{Platz}$ und das maximale Volumen 8.000 m^3 (siehe Abb. 37).

3.6.1 Übersichts-, Annäherungs- & Rechnungsmethoden

Die Berechnungstabellen für die hier beschriebenen Methoden zur Nachhallzeitberechnung sowie die raumakustischen Maßnahmen, die auf die beiden Hauptsäle des Entwurfs angewendet werden, finden sich in Kapitel 3.6.3.

Variante 1: Die Überschlagsmethode zur Nachhallzeitberechnung verwendet einen äquivalenten Schallabsorptionsgrad $\alpha_{\text{äqu}}$ für die Gestühlfläche S_{Gest} (siehe Abb. 62), da in der Regel davon ausgegangen werden kann, dass das Publikum die größte schallabsorbierende Fläche darstellen wird. Die Nachhallzeit berechnet sich nach Gl. (21).

Oktavband-Mittenfrequenz f_m [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
äquivalenter Schallabsorptionsgrad $\alpha_{\text{äqu}}$	0,85	0,95	1,05	1,15	1,25	1,35	1,45

Abb. 62: Äquivalenter Schallabsorptionsgrad $\alpha_{\text{äqu}}$ für Darbietungsräume im besetzten Zustand (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 145)

$$T = 0,163 \cdot V / (S_{\text{Gest}} \cdot \alpha_{\text{äqu}}) [\text{s}] \quad (21)^{61}$$

Variante 2: Die Annäherungsmethode zur Berechnung der Nachhallzeit berücksichtigt zusätzlich zur Publikumsfläche die Restschallabsorptionsflächen durch Bühnenöffnung, Restflächen und Musiker bzw. Darsteller (siehe Abb. 63).

$$A_{\text{ges}} = \alpha_{\text{Pu}} S_{\text{Pu}} + \alpha_{\text{Bü}} S_{\text{Bü}} + A_{\text{Mu}} N_{\text{Mu}} + \alpha_{\text{R}} S_{\text{R}} [\text{m}^2] \quad (22)^{62}$$

$\alpha_{\text{Pu}} S_{\text{Pu}}$...äquivalente Schallabsorptionsfläche des Publikums [m^2]

S_{Pu} ...Gestühlflächen einschließlich 0,5 m breite, umlaufende Flächen von anschließenden Gängen [m^2]

$\alpha_{\text{Bü}} S_{\text{Bü}}$...äquivalente Schallabsorptionsfläche einer eventuellen Bühnenöffnung [m^2]

$S_{\text{Bü}}$...Fläche der Bühnenöffnung [m^2]

$A_{\text{Mu}} N_{\text{Mu}}$...äquivalente Schallabsorptionsfläche der Musiker [m^2]

N_{Mu} ...Anzahl der Musiker (für Sinfonieorchester etwa 100)

$\alpha_{\text{R}} S_{\text{R}}$...äquivalente Schallabsorptionsfläche der Saaloberfläche [m^2]

S_{R} ...Saaloberfläche ohne Gestühlfläche S_{Pu} , ohne Fläche der Bühnenöffnung $S_{\text{Bü}}$ und ohne Fläche des Podiums bzw. des ungedeckten Teiles des Orchestergrabens [m^2]

⁶¹ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 145

⁶² FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 145

Schallabsorbierende Flächen und Personen	Oktavband-Mittenfrequenz f_m [Hz]		
	125 bis 250	500 bis 1000	2000 bis 4000
	Schallabsorptionsgrad α		
Gestühlflächen (α_{Pu})	0,4	0,6	0,8
Bühnenöffnung (α_{Bu})	0,4	0,6	0,8
Restflächen (α_R)	0,1	0,05 bis 0,1	0,05
äquivalente Schallabsorptionsfläche A [m ²]			
Musiker (A_{Mu})	0,7	1,1	1,1

Abb. 63: Schallabsorptionsgrade α von Saaloberflächen und äquivalente Schallabsorptionsflächen A_{Mu} von Musikern zur Bestimmung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche eines Raumes mittels Restschallabsorption (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 146)

Variante 3: Die Berechnung der Nachhallzeit mit genaueren Angaben zu den Teilflächen erfolgt unter Verwendung der Publikumsfläche S_{Pu} (3a) bzw. mithilfe der äquivalenten Schallabsorptionsfläche des Publikums pro Person (3b).

$$A_1 = \sum \alpha_{1i} * S_{1i} + \sum A_{1j} + A_{L1} \text{ [m}^2\text{]} \quad (23)^{63}$$

S_{1i} ... Teilflächen des Raumes [m²]

α_{1i} ... Schallabsorptionsgrad der Teilflächen

A_{1j} ... äquivalente Schallabsorptionsflächen einzelner Personen und nicht flächenhaft wirkender Schallabsorber und Einrichtungsgegenstände [m²]

A_{L1} ... äquivalente Schallabsorptionsfläche der Luft [m²]: $A_{L1} = 4 * V * m$

V ... Raumvolumen

m ... Energiedämpfungskonstante der Luft [m⁻¹]

Bei den äquivalenten Schallabsorptionsflächen $\alpha_{1i} * S_{1i}$ handelt es sich um Raumbegrenzungsflächen wie Wände, Decke und Boden, Publikumsfläche, Bühnenöffnungen, Fenster, Vorhänge und gegebenenfalls geplante Schallabsorber. Die Publikumsfläche S_{Pu} besteht aus der Gestühlfläche S_{Gest} und aus einem mit 0,5 m angenommenen Randstreifen, der die Gestühlfläche auf allen Seiten umgibt⁶⁴. Die nötigen Schallabsorptionsgrade α für die Raumbegrenzungsflächen, Publikumsflächen und Personen finden sich in Abb. 26 und Abb. 27.

3.6.2 Raumakustische Maßnahmen

Beim Vergleich der berechneten Nachhallzeiten T_1 mit der optimalen Nachhallzeit T_{opt} , stellt man fest, dass gerade für den unteren Frequenzbereich bis 500 Hz raumakustische Gegenmaßnahmen in Form von technischen Schallabsorbern in den Hauptsälen installiert

⁶³ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 143

⁶⁴ Vgl. FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 144

werden müssen. Zur Veranschaulichung werden in diesem Beispiel Helmholtzresonatoren herangezogen, da sie in diesem Frequenzbereich besonders effektiv sind. Zuerst muss die zusätzlich erforderliche äquivalente Schallabsorptionsfläche ΔA ermittelt werden:

$$\Delta A = A_{\text{opt}} - A_1 \text{ [m}^2\text{] wobei gilt:} \quad (24)^{65}$$

$$\Delta A = \sum \alpha_i * S_i + \sum A_j \text{ [m}^2\text{]} \quad (25)^{66}$$

S_i ...schallabsorbierende Flächen wie z.B. poröse Schallabsorber, Plattenschwinger, Vorhänge [m²]

α_i ...Schallabsorptionsgrad der schallabsorbierenden Flächen

A_j ...äquivalente Schallabsorptionsflächen von Einzelabsorbern wie z.B. Helmholtzresonatoren [m²]

Da die genaue mathematische Berechnung von Helmholtzresonatoren relativ aufwändig ist, wird hier nur eine Bemessungsgrundlage angeführt. Aus Abb. 64 lässt sich je nach Öffnungsform, Resonatorhalslänge t , Schlitzbreite b und erwünschter Resonanzfrequenz f_0 das nötige Resonatorvolumen V und die äquivalente Schallabsorptionsfläche A ablesen.

In der **Alten Volksschule** werden für die überpräsen 125 Hz insgesamt 30 schlitzförmige Resonatoren mit einer Schlitzbreite von 10 cm im unterem Randbereich der Seitenwände eingesetzt. In der **Alten Feuerwehr** sind es insgesamt 22 Stück, die in der Decke eingebaut sind. Die verbesserte Nachhallzeit sollte innerhalb einer Streuungsgrenze von $\pm 20\%$ bzw. im strichlierten Idealbereich von Abb. 65 liegen. Zusätzlich ergeben die Nachhallzeiten in der Alten Feuerwehr ein sehr gutes Bassverhältnis von 1,2. Wie ebenfalls aus den Berechnungstabellen zu entnehmen ist, liegen die Nachhallzeiten ab über 2000 Hz bei voller Besetzung der Auditorien generell unter den optimalen Werten, was sich auf die Klangfarbe auswirkt und hauptsächlich auf die Publikumsabsorption zurückzuführen ist. In der Praxis wird im Schnitt von einer 80 prozentigen Besetzung ausgegangen, womit die Nachhallzeiten im höheren Frequenzbereich eine breitere Streuung aufweisen dürfen, wie auch in Abb. 65 zu sehen ist⁶⁷.

⁶⁵ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 144

⁶⁶ FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 144

⁶⁷ Vgl. FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 149

Öffnung		schlitzförmig Schlitzlänge: 1 m			schlitzförmig Schlitzlänge: 1 m		
f_0 [Hz]	t [cm]	Schlitzbreite b			Schlitzbreite b		
		2 cm	5 cm	10 cm	2 cm	5 cm	10 cm
		Resonatorvolumen V [dm ³]			äquivalente Schallabsorptionsfläche A [m ²]		
125	1	56,0	75,5	96,0	0,51	0,69	0,88
	2	49,0	70,0	91,5	0,45	0,64	0,84
	4	39,0	61,0	83,5	0,36	0,56	0,76
	8	27,5	48,5	71,0	0,25	0,44	0,65

Abb. 64: Für die Resonanzfrequenz $f_0 = 125$ Hz von Helmholtzresonatoren erforderliches Volumen V bei schlitzförmigen Öffnungen (Schlitzlänge: 1 m) verschiedener Resonatorhalslängen t und die dazugehörige äquivalente Schallabsorptionsfläche A
(FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 91 + 94)

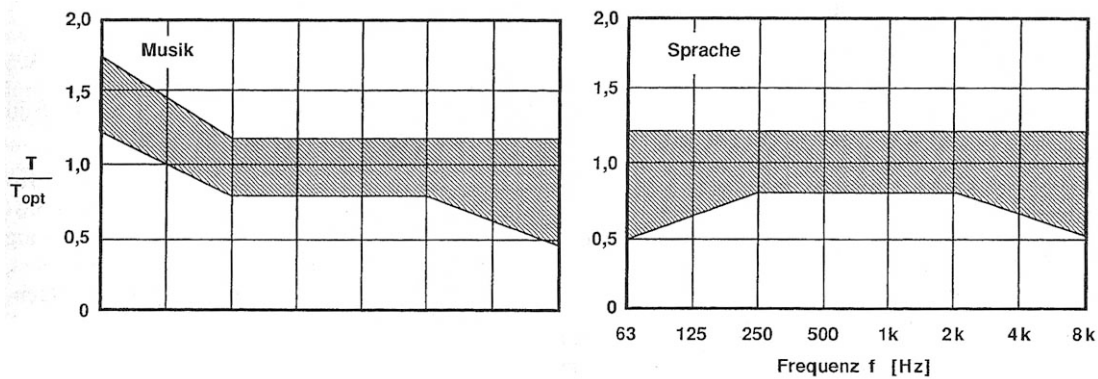


Abb. 65: Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit T bezogen auf den Optimalwert der mittleren Nachhallzeit T_{opt} nach Abb. 35 (FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 139)

3.6.3 Berechnungstabellen

Alte Volksschule	l [m]	b [m]	h [m]	A [m ²]	V [m ³]	Pers.	Optimalwerte für den Hauptsaal	
Raumvolumen V_{ges}	18,8	8,2	5,7		878,7		Volumenkennzahl $K = V / \text{Plätze}$	6,1
S_{Decke}, S_{Boden}	18,8	8,2		154,2			mittlere Nachhallzeit T_{opt} [s] aus Abb. 35	1,1
$S_{Seitenwände}$	18,8		5,7	107,2			äqui. Schallabsorptionsfläche $A_{opt}^{[1]}$	130,2
$S_{Vorderwand}, S_{Rückwand}$		8,2	5,7	46,7				
Gesamtoberfläche S_{ges}				616,1				
Bühnenbegrenzungsflächen	4,0	8,2	5,1	115,4				
Bühnenfläche $S_{Bühne}$	4,0	8,2	0,6	32,8				
Gestühlfläche S_{Gest}	11,3	6,9		78,0				
Publikumsfläche S_{pu}	12,3	7,9		97,2				
Publikumsanzahl						143		
Darsteller (2 m ² pro Person)						16		

Raumbegrenzungsflächen	Fläche S [m ²] Personen	Oktavband-Mittenfrequenz f _m [Hz]											
		125		250		500		1000		2000		4000	
		Schallabsorptionsgrad α, äquivalente Schallabsorptionfläche A [m ²]											
		α	A	α	A	α	A	α	A	α	A	α	A
Variante 1: Überschlagsmäßige Nachhallzeitberechnung mittels der Gestühlfläche													
Äquivalenter Schallabsorptionsgrad α _{äqu} der Gestühlfläche von Räumen im besetzten Zustand aus Abb. 62													
Gestühlfläche S _{Gest}	78,0	0,95	74,1	1,05	81,9	1,15	89,7	1,25	97,5	1,35	105,3	1,45	113,1
T ₁ [s]		1,93		1,75		1,60		1,47		1,36		1,27	

Variante 2: Annähernde Nachhallzeitberechnung mittels Publikumsfläche, Restfläche und Darsteller													
Schallabsorptionsgrad α von Publikumsfläche, Restfläche und Darsteller aus Abb. 63													
Publikumsfläche S _{Pu}	97,2	0,40	38,9	0,40	38,9	0,60	58,3	0,60	58,3	0,80	77,7	0,80	77,7
Restfläche S _R = S _{ges} - S _{Pu}	519,0	0,10	51,9	0,10	51,9	0,07	36,3	0,07	36,3	0,05	25,9	0,05	25,9
Darsteller A _{Mu}	16	0,70	11,2	0,70	11,2	1,10	17,6	1,10	17,6	1,10	17,6	1,10	17,6
A ₁ [m²]			102,0		102,0		112,2		112,2		121,3		121,3
T ₁ [s]		1,40		1,40		1,28		1,28		1,18		1,18	

Variante 3a: Genauere Nachhallzeitberechnung mittels Teilflächen und Publikumsfläche S_{Pu}													
Schallabsorptionsgrad α von Raumbegrenzungsflächen und Publikumsfläche aus Abb. 26 + Abb. 27													
Oberflächen verputzt (ohne Fußboden und Fenster)	346,5	0,02	6,9	0,03	10,4	0,04	13,9	0,05	17,3	0,06	20,8	0,08	27,7
Bühnenwände Holzschalung	115,4	0,03	3,5	0,04	4,6	0,04	4,6	0,05	5,8	0,05	5,8	0,05	5,8
Fenster		0,12		0,10		0,05		0,04		0,02		0,02	
Parkettboden hohl liegend	76,2	0,10	7,6	0,08	6,1	0,06	4,6	0,05	3,8	0,05	3,8	0,05	3,8
Publikum auf Holzgestühl	97,2	0,40	38,9	0,60	58,3	0,75	72,9	0,80	77,7	0,85	82,6	0,80	77,7
Darsteller	16	0,35	5,6	0,65	10,4	0,85	13,6	1,00	16,0	1,10	17,6	1,10	17,6
Luftabsorption A _{L1} = (4 * m * V) ^[2]	m [10 ⁻³ m ⁻¹] =			0,08	0,3	0,25	0,9	0,75	2,6	2,50	8,8	7,50	26,4
A ₁ [m²]			62,5		90,1		110,4		123,3		139,4		159,0
T ₁ [s]		2,29		1,59		1,30		1,16		1,03		0,90	

Variante 3b: Genauere Nachhallzeitberechnung mittels Teilflächen und äquivalenter Schallabsorptionsfläche des Publikums													
Schallabsorptionsgrad α von Raumbegrenzungsflächen und äquivalente Schallabsorptionsfläche A des Publikums aus Abb. 26 + Abb. 27													
Oberflächen verputzt (ohne Fußboden und Fenster)	346,5	0,02	6,9	0,03	10,4	0,04	13,9	0,05	17,3	0,06	20,8	0,08	27,7
Bühnenwände Holzschalung	115,4	0,03	3,5	0,04	4,6	0,04	4,6	0,05	5,8	0,05	5,8	0,05	5,8
Fenster													
Parkettboden hohl liegend	154,2	0,10	15,4	0,08	12,3	0,06	9,2	0,05	7,7	0,05	7,7	0,05	7,7
Publikumsanzahl	143	0,25	35,8	0,45	64,4	0,60	85,8	0,65	93,0	0,75	107,3	0,75	107,3
Darsteller	16	0,35	5,6	0,65	10,4	0,85	13,6	1,00	16,0	1,10	17,6	1,10	17,6
Luftabsorption A _{L1} = (4 * m * V)	m [10 ⁻³ m ⁻¹] =			0,08	0,3	0,25	0,9	0,75	2,6	2,50	8,8	7,50	26,4
A ₁ [m²]			67,2		102,4		128,0		142,4		167,9		192,4
T ₁ [s]		2,13		1,40		1,12		1,01		0,85		0,74	

Optimalwerte für den Hauptsaal zur weiteren Bemessung der raumakustischen Maßnahmen													
Äquivalente Schallabsorptionsfläche A ₁ und Nachhallzeit T ₁ aus Varianten 3a und 3b werden gemittelt und gerundet.													
T _{opt} [s] aus Abb. 35		1,1		1,1		1,1		1,1		1,1		1,1	
A _{opt} = 0,163 * V / T _{opt} [m²]		130,2		130,2		130,2		130,2		130,2		130,2	
ΔA = A _{opt} - A ₁ [m²]		65		34		11		-3		-23		-45	
T ₁ /T _{opt} (siehe Abb. 65)		2,0		1,4		1,1		1,0		0,9		0,7	

Helmholtzresonatoren schlitzförmig, Schlitzlänge: 1 m, Schlitzbreite: 10 cm													
h = 18,0 b = 3,0 t = 1,8 [dm]													
	Stück	Oktavband-Mittenfrequenz f _m [Hz]											
		125		250 ^[3]		500 ^[3]		1000 ^[3]		2000 ^[3]		4000 ^[3]	
		V	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Resonatorvolumen V [dm³] aus Abb. 64		96,0											
A in Raummitte [m²] aus Abb. 64	0		0,88		0,44		0,22		0,11		0,06		0,03
A an Rand [m²] ^[4]	26		1,76		0,88		0,44		0,22		0,11		0,06
A an Ecke [m²] ^[4]	4		3,52		1,76		0,88		0,44		0,22		0,11
A _{Res} [m²]			59,8		29,9		15,0		7,5		3,7		1,9
Verbesserte A ₁ [m²]			124,7		126,1		134,2		140,3		157,4		177,6
Verbesserte Nachhallzeit T ₁ [s]		1,15		1,14		1,07		1,02		0,91		0,81	
T ₁ /T _{opt} (siehe Abb. 65)		1,0		1,0		1,0		0,9		0,8		0,7	

^[1] Sabine'sche Nachhallzeitformel $T = 0,163 \cdot V / A$. Daraus ergibt sich $A_{opt} = 0,163 \cdot V / T_m [m^2]$

^[2] vgl. FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 102

^[3] vgl. FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 85

^[4] vgl. FASOLD, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2003, S. 93

Alte Feuerwehr	l [m]	b [m]	h [m]	A [m ²]	V [m ³]	Pers.	Optimalwerte für den Hauptsaal	
Raumvolumen V_{ges}	20,2	8,1	6,0		981,7		Volumenkennzahl $K = V / \text{Plätze}$	6,5
$S_{\text{Decke}} - S_{\text{Boden}}$	20,2	8,1		163,6			mittlere Nachhallzeit T_{opt} [s] aus Abb. 35	1,3
$S_{\text{Seitenwände}}$	20,2		6,0	121,2			äqui. Schallabsorptionsfläche A_{opt}	123,1
$S_{\text{Vorderwand}} - S_{\text{Rückwand}}$		8,1	6,0	48,6				
Gesamtfläche S_{ges}				666,8				
Bühnenbegrenzungsflächen	5,0	8,1	5,4	138,2				
Bühnenfläche $S_{\text{Bühne}}$	5,0	8,1	0,6	40,5				
Gestühlfläche S_{Gest}	13,8	5,8		80,0				
Publikumsfläche S_{pu}	14,8	6,8		100,6				
Publikumsanzahl						150		
Musiker (2 m ² pro Person)						30		

Raumbegrenzungsflächen	Fläche S [m²] Personen	Oktavband-Mittenfrequenz f _m [Hz]											
		125	250	500	1000	2000	4000						
		Schallabsorptionsgrad α, äquivalente Schallabsorptionfläche A [m²]											
		α	A	α	A	α	A	α	A	α	A		
Variante 1: Überslagsmäßige Nachhallzeitberechnung mittels der Gestühlfläche													
Äquivalenter Schallabsorptionsgrad α _{äq} der Gestühlfläche von Räumen im besetzten Zustand aus Abb. 62													
Gestühlfläche S _{Gest}	80,0	0,95	76,0	1,05	84,0	1,15	92,0	1,25	100,1	1,35	108,1	1,45	116,1
T ₁ [s]		2,10		1,90		1,74		1,60		1,48		1,38	

Variante 2: Annähernde Nachhallzeitberechnung mittels Publikumsfläche, Restfläche und Musiker									
Schallabsorptionsgrad α_R von Publikumsfläche, Restfläche und Musiker aus Abb. 63									
Publikumsfläche S_{pu}	100,6	0,40	40,3	0,40	40,3	0,60	60,4	0,60	60,4
Restfläche $S_R = S_{\text{ges}} - S_{\text{pu}}$	566,2	0,10	56,6	0,10	56,6	0,07	39,6	0,07	39,6
Musiker A_{Mu}	30	0,70	21,0	0,70	21,0	1,10	33,0	1,10	33,0
A_1 [m ²]			117,9		117,9		133,0		133,0
T_1 [s]		1,36	1,36	1,20	1,20	1,13	1,13		

Variante 3a: Genauere Nachhallzeitberechnung mittels Teilflächen und Publikumsfläche S_{pu}									
Schallabsorptionsgrad α von Raumbegrenzungsflächen und Publikumsfläche aus Abb. 26 + Abb. 27									
Oberflächen Holzschalung (ohne Fußboden und Fenster)	365,0	0,03	10,9	0,04	14,6	0,04	14,6	0,05	18,2
Bühnenwände Holzschalung	138,2	0,03	4,1	0,04	5,5	0,04	5,5	0,05	6,9
Fenster		0,12		0,10		0,05		0,04	
Parkettboden hohl liegend	83,6	0,10	8,4	0,08	6,7	0,06	5,0	0,05	4,2
Publikum auf Holzgestühl	100,6	0,40	40,3	0,60	60,4	0,75	75,5	0,80	80,5
Musiker	30	0,35	10,5	0,65	19,5	0,85	25,5	1,00	30,0
Luftabsorption $A_{\text{L1}} = (4 * m * V)$	$m [10^{-3} \text{ m}^{-1}] =$			0,08	0,3	0,25	1,0	0,75	2,9
A_1 [m ²]			74,2		107,0		127,1		142,8
T_1 [s]		2,16	1,50	1,26	1,12	1,01	0,93		

Variante 3b: Genauere Nachhallzeitberechnung mittels Teilflächen und äquivalenter Schallabsorptionsfläche des Publikums									
Schallabsorptionsgrad α von Raumbegrenzungsflächen und äquivalente Schallabsorptionsfläche A des Publikums aus Abb. 26 + Abb. 27									
Oberflächen Holzschalung (ohne Fußboden und Fenster)	365,0	0,03	10,9	0,04	14,6	0,04	14,6	0,05	18,2
Bühnenwände Holzschalung	138,2	0,03	4,1	0,04	5,5	0,04	5,5	0,05	6,9
Fenster									
Parkettboden hohl liegend	163,6	0,10	16,4	0,08	13,1	0,06	9,8	0,05	8,2
Publikumsanzahl	150	0,25	37,5	0,45	67,5	0,60	90,0	0,65	97,5
Musiker	30	0,35	10,5	0,65	19,5	0,85	25,5	1,00	30,0
Luftabsorption $A_{\text{L1}} = (4 * m * V)$	$m [10^{-3} \text{ m}^{-1}] =$			0,08	0,3	0,25	1,0	0,75	2,9
A_1 [m ²]			79,5		120,5		146,4		163,8
T_1 [s]		2,01	1,33	1,09	0,98	0,85	0,77		

Optimalwerte für den Hauptsaal zur weiteren Bemessung der raumakustischen Maßnahmen									
Äquivalente Schallabsorptionsfläche A_1 und Nachhallzeit T_1 aus Varianten 3a und 3b werden gemittelt und gerundet.									
T_{opt} [s] aus Abb. 35		1,3		1,3		1,3		1,3	
$A_{opt} = 0,163 \cdot V / T_{opt}$ [m ²]		123,1		123,1		123,1		123,1	
$\Delta A = A_{opt} - A_1$ [m ²]		46		9		-14		-30	
T_1/T_{opt} (siehe Abb. 65)		1,6		1,1		0,9		0,8	

Helmholtzresonatoren schlitzförmig, Schlitzlänge: 1 m, Schlitzbreite: 10 cm h = 22,0 b = 3,0 t = 1,5 [dm]									
	Stück	Oktavband-Mittenfrequenz f_m [Hz]							
		125	250	500	1000	2000	4000		
		V	A	A	A	A	A	A	A
Resonatorvolumen V [dm ³] aus Abb. 64		96,0							
A in Raummitte [m ²] aus Abb. 64	0	0,88	0,44	0,22	0,11	0,06	0,03		
A an Rand [m ²]	18	1,76	0,88	0,44	0,22	0,11	0,06		
A an Ecke [m ²]	4	3,52	1,76	0,88	0,44	0,22	0,11		
A_{Res} [m ²]		45,8	22,9	11,4	5,7	2,9	1,4		
Verbesserte A_1 [m ²]		122,6	136,6	148,2	159,0	176,0	191,7		
Verbesserte Nachhallzeit T_1 [s]		1,31	1,17	1,08	1,01	0,91	0,83		
T_1/T_{opt} (siehe Abb. 65)		1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,6		

Bass Ratio $BR = (T_{125} + T_{250}) / (T_{500} + T_{1000})$	1,2
--	-----

3.7 Energiekonzept

Zusätzlich zur Nachhallzeitberechnung wurde noch ein grobes Energiekonzept für den Entwurf zusammengestellt. Der Wärmedurchgang (U-Wert) wurde exemplarisch bei den wichtigsten Bauteilen berechnet und direkt bei den Details (Kapitel 3.9) eingetragen. Eine Bauteilliste und die dazugehörigen Berechnungen befinden sich im Anhang.

- **Energieversorgung:** Die Gebäude werden mit Fernwärme und einer Grundwasser-Wärmepumpe versorgt. Da sich in unmittelbarer Umgebung ein Fluss befindet, kann mit ausreichender Wasserversorgung gerechnet werden.
- **Wärme-/Kühlungsverteilung:** Die Verteilung der Heizenergie erfolgt über in den Estrich eingelegte Heiz-/Kühlschläuche. Zur Kühlung wird Grundwasser verwendet und ebenfalls über jene Schläuche verteilt. Die Kühlwasserversorgung erfolgt über eine Brunnenkühlanlage.
- **Lüftung:** Hier wird das Prinzip der Quelläftung angewandt, bei welcher Zuluftöffnungen (Ausblasgeschwindigkeit 0,1 bis 0,2 m/s) in Bodennähe angebracht werden. Die Abluft wird über Luftkanäle an der Deckenunterseite an die Wärmerückgewinnungsanlage weitergeleitet. Alle Räume werden mechanisch belüftet, womit der Heizwärmebedarf aufgrund der Reduktion von Lüftungswärmeverlusten verringert wird.
- **Sonnenschutz:** Vorgesetzte Fassadenelemente und Raffstores gewährleisten den Sonnen- und Blendschutz (siehe Detail C).
- **Sanierung:** Der Bestand der Alten Volksschule wird mittels Vollwärmeschutz und gegebenenfalls Fenstererneuerung auf aktuellen energetischen Standard gebracht.

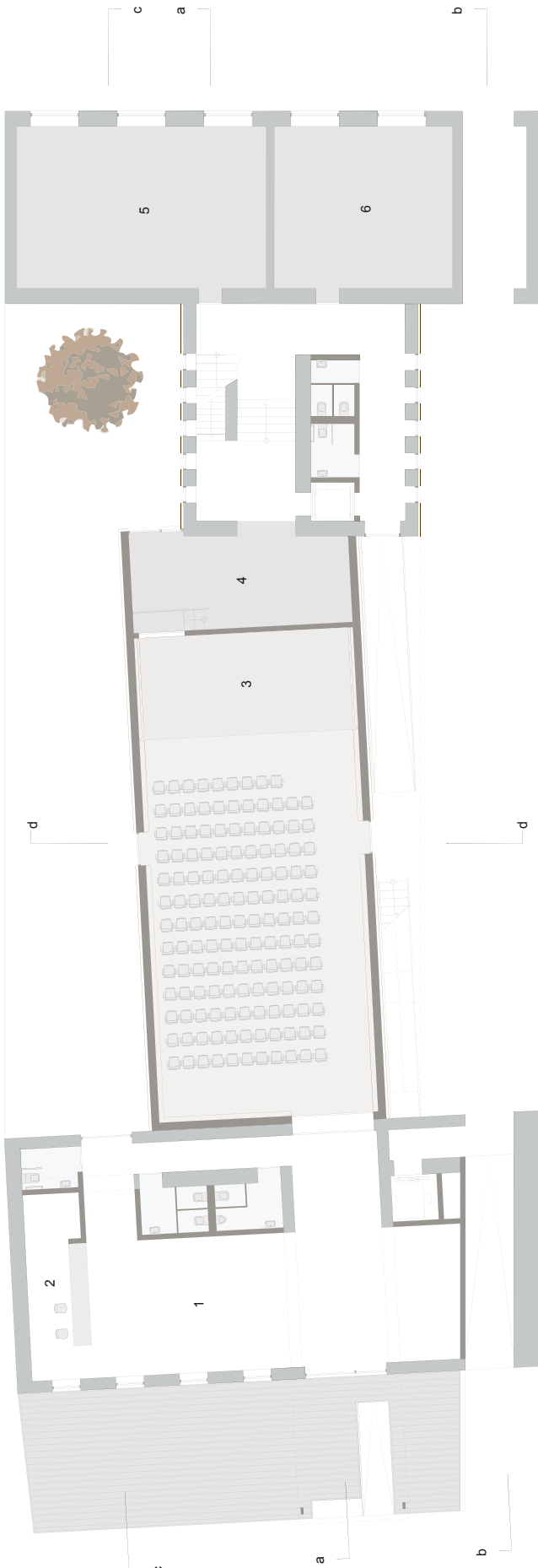
3.8 Planzeichnungen





Alte Volksschule

- 1 Foyer
- 2 Kassa/Garderobe
- 3 Theatersaal
- 4 Hinterbühne
- 5 Proberaum
- 6 Theaterbüro
- 7 Vereinsraum
- 8 Künstlergarderobe
- 9 Künstlerwohnung
- 10 Technikraum

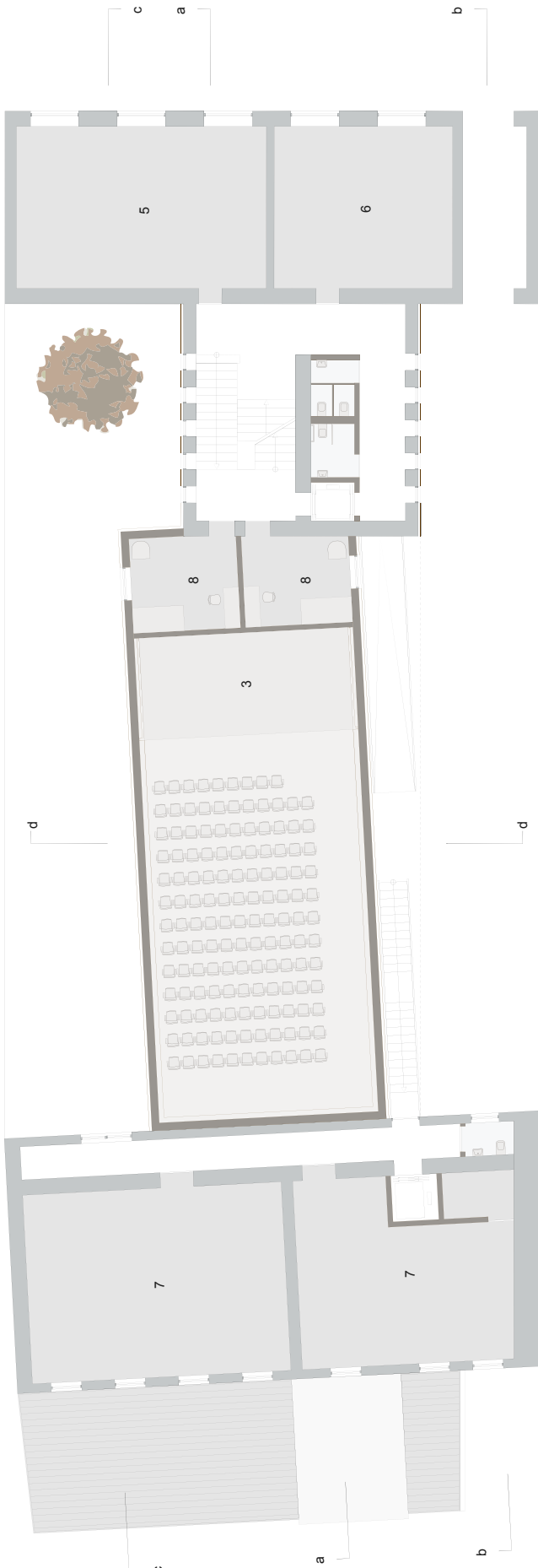


EG



Alte Volksschule

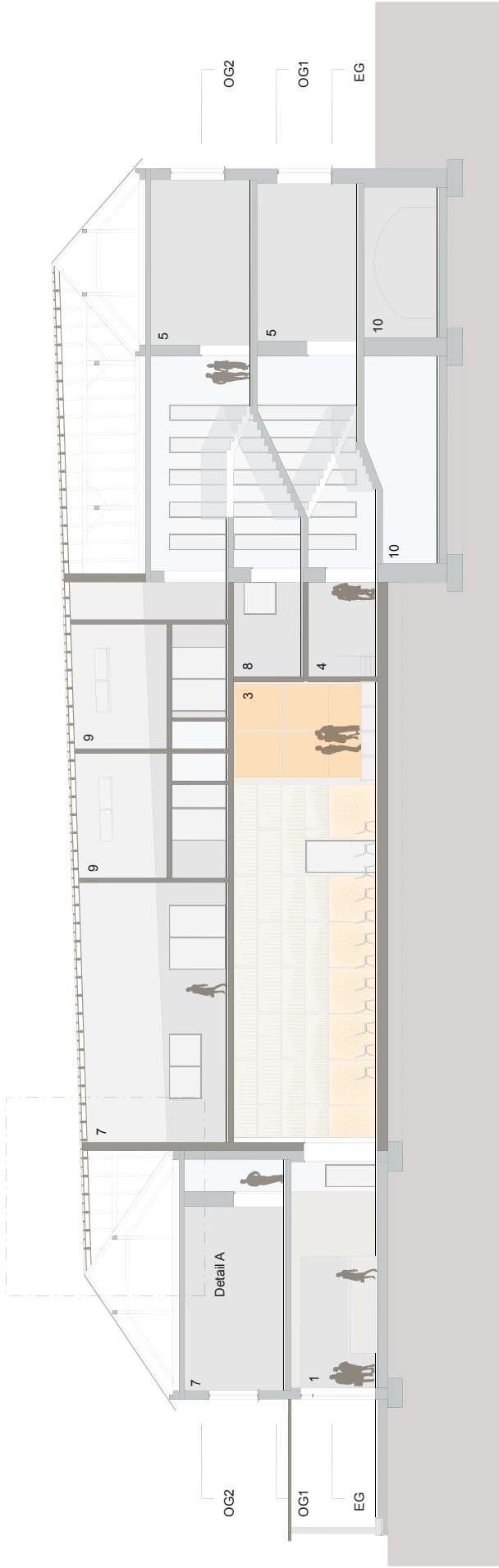
- 1 Foyer
- 2 Kassa/Garderobe
- 3 Theatersaal
- 4 Hinterbühne
- 5 Proberaum
- 6 Theaterbüro
- 7 Vereinsraum
- 8 Künstlergarderobe
- 9 Künstlerwohnung
- 10 Technikraum



OG1

Alte Volksschule

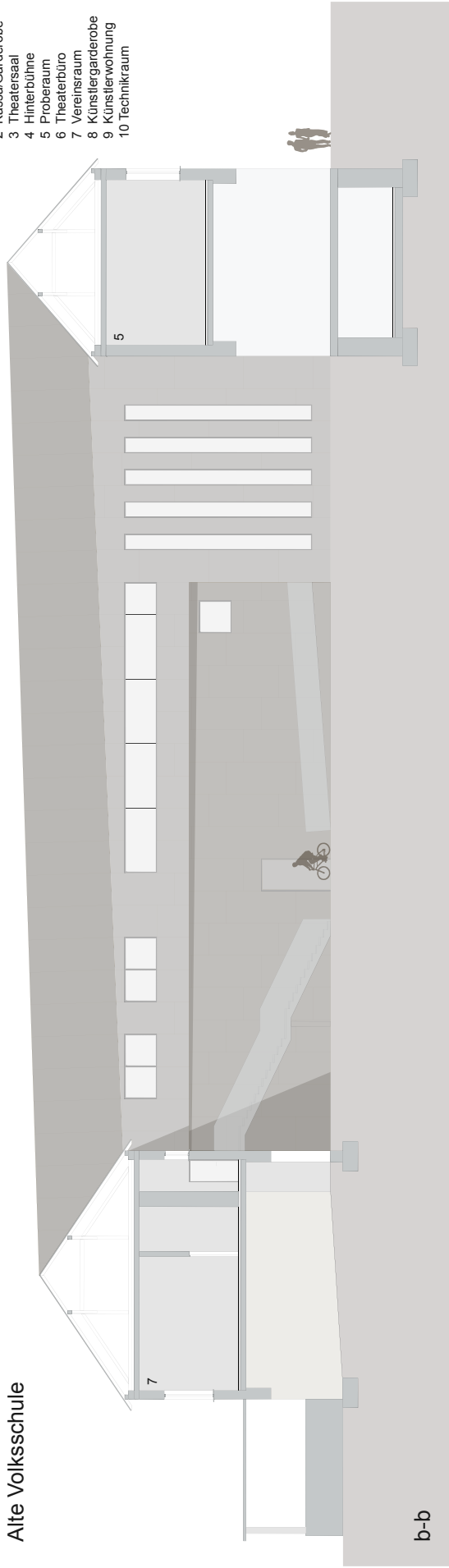
- 1 Foyer
- 2 Kassa/Garderobe
- 3 Theatersaal
- 4 Hinterbühne
- 5 Proberaum
- 6 Theaterbüro
- 7 Vereinsraum
- 8 Künstlergarderobe
- 9 Künstlerwohnung
- 10 Technikraum



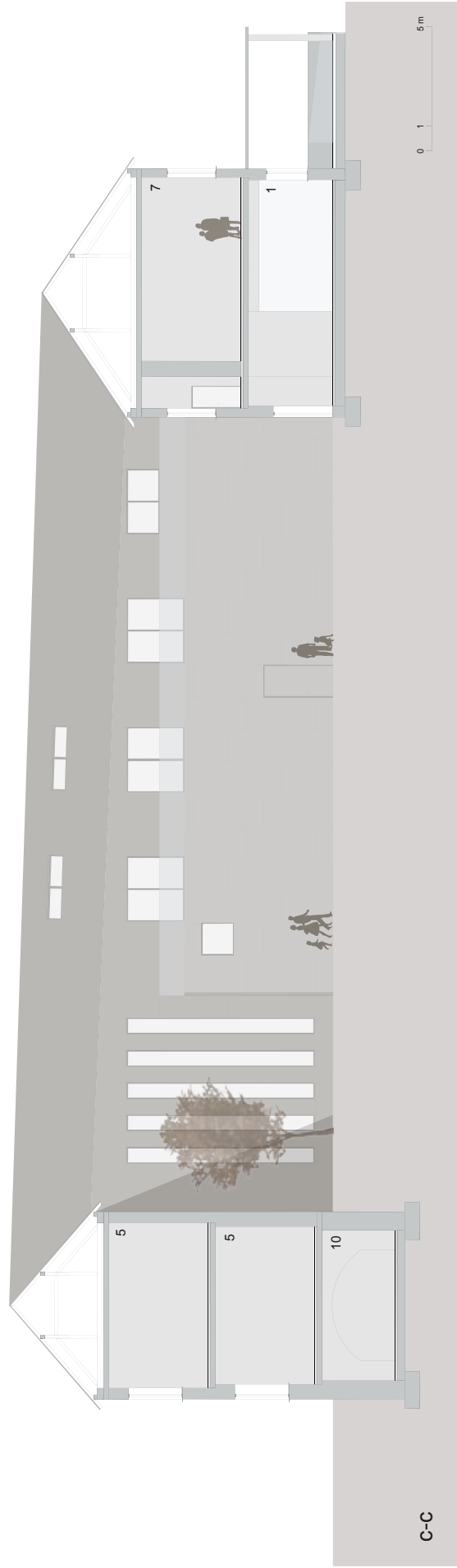
a-a

- 1 Foyer
- 2 Kassa/Garderobe
- 3 Theatersaal
- 4 Hinterbühne
- 5 Proberaum
- 6 Theaterbüro
- 7 Vereinsraum
- 8 Künstlergarderobe
- 9 Künstlerwohnung
- 10 Technikraum

Alte Volksschule



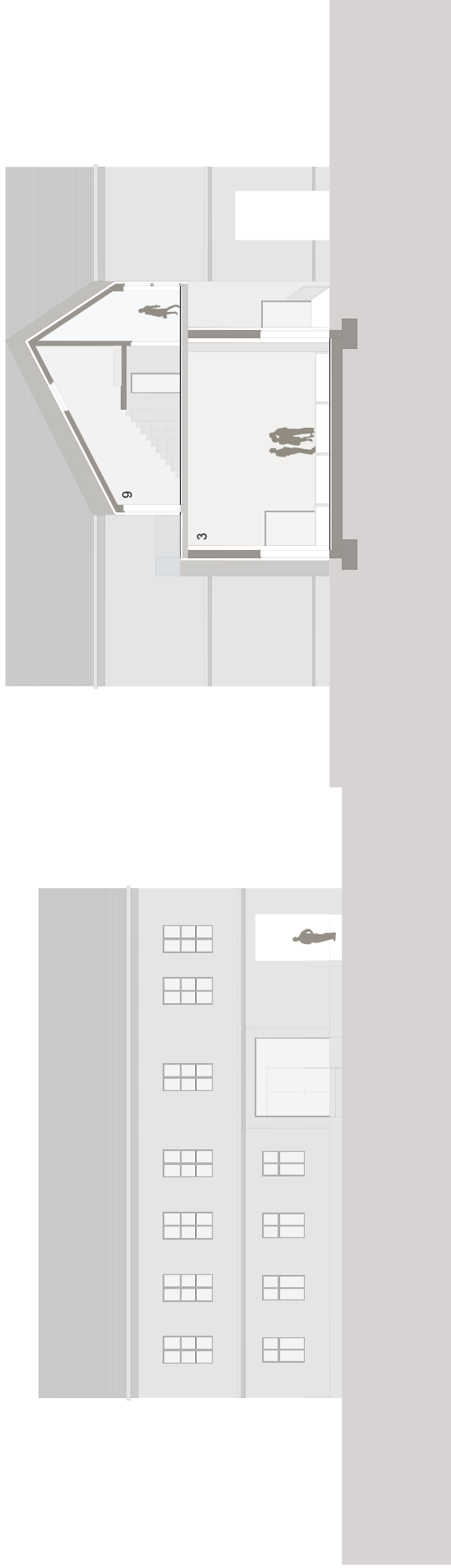
b-b



c-c

Alte Volksschule

- 1 Foyer
- 2 Kassa/Garderobe
- 3 Theatersaal
- 4 Hinterbühne
- 5 Proberaum
- 6 Theaterbüro
- 7 Vereinsraum
- 8 Künstlergarderobe
- 9 Künstlerwohnung
- 10 Technikraum

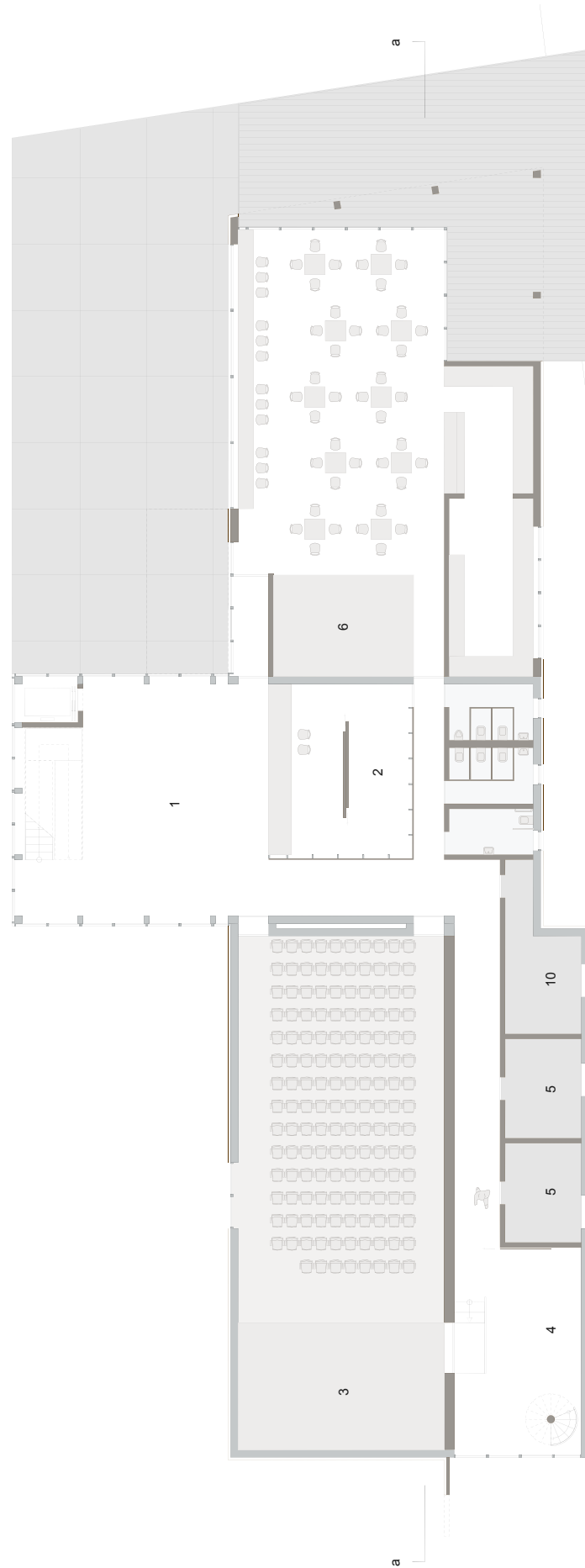


Frontfassade, d-d

0 1 5 m

Alte Feuerwehr

- 1 Foyer
- 2 Kassa/Garderobe
- 3 Konzertsaal
- 4 Hinterbühne
- 5 Proberaum
- 6 Café
- 7 Ausstellungsraum
- 8 Künstlergarderobe
- 9 Lagerraum
- 10 Technikraum

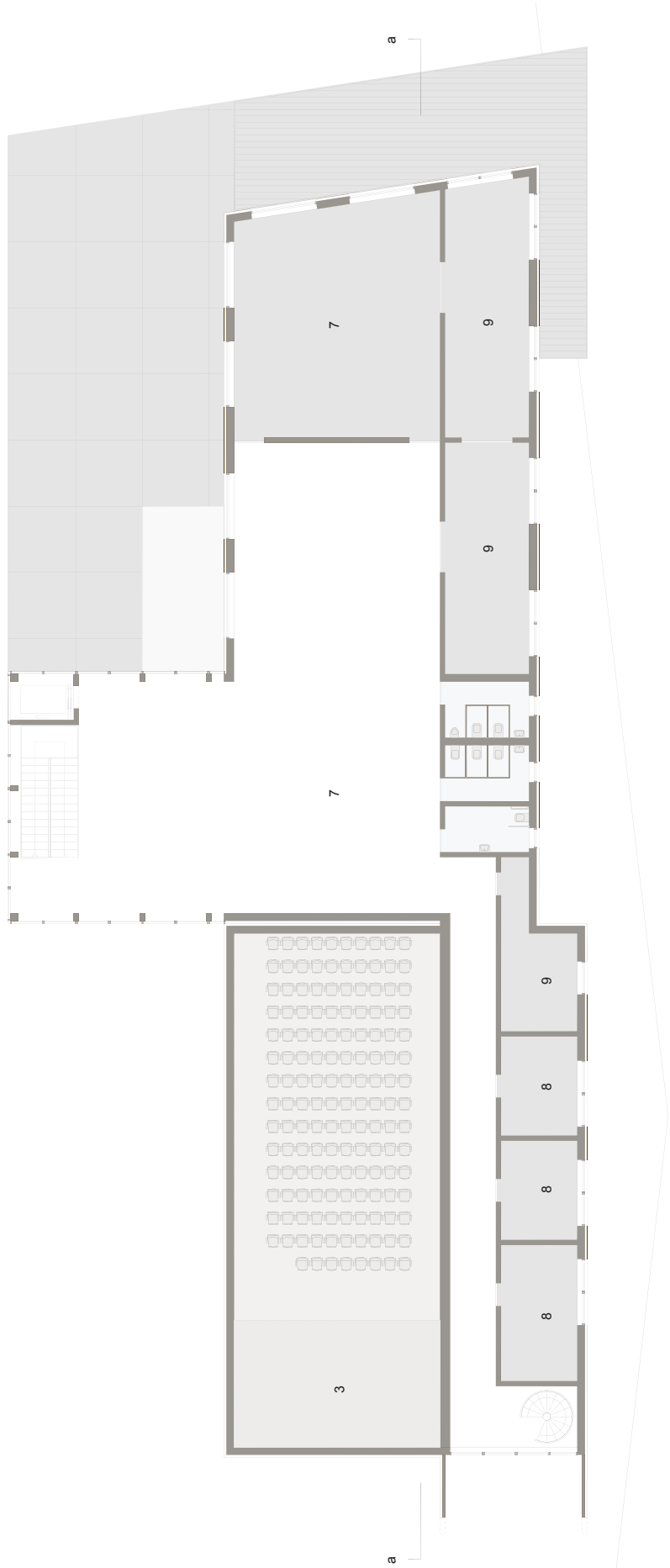


EG



Alte Feuerwehr

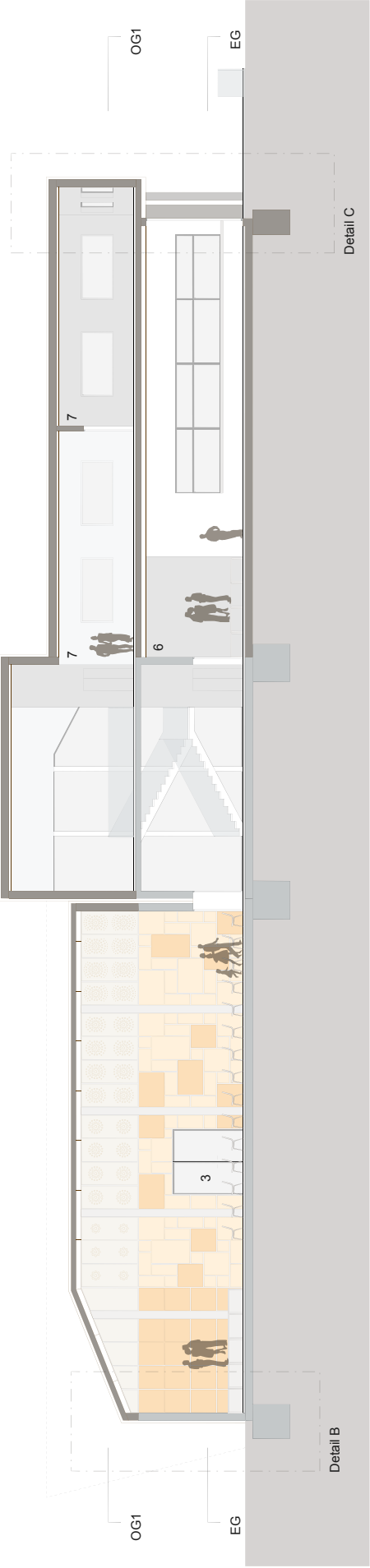
- 1 Foyer
- 2 Kassa/Garderobe
- 3 Konzertsaal
- 4 Hinterbühne
- 5 Proberaum
- 6 Café
- 7 Ausstellungsraum
- 8 Künstlergarderobe
- 9 Lagerraum
- 10 Technikraum



OG1

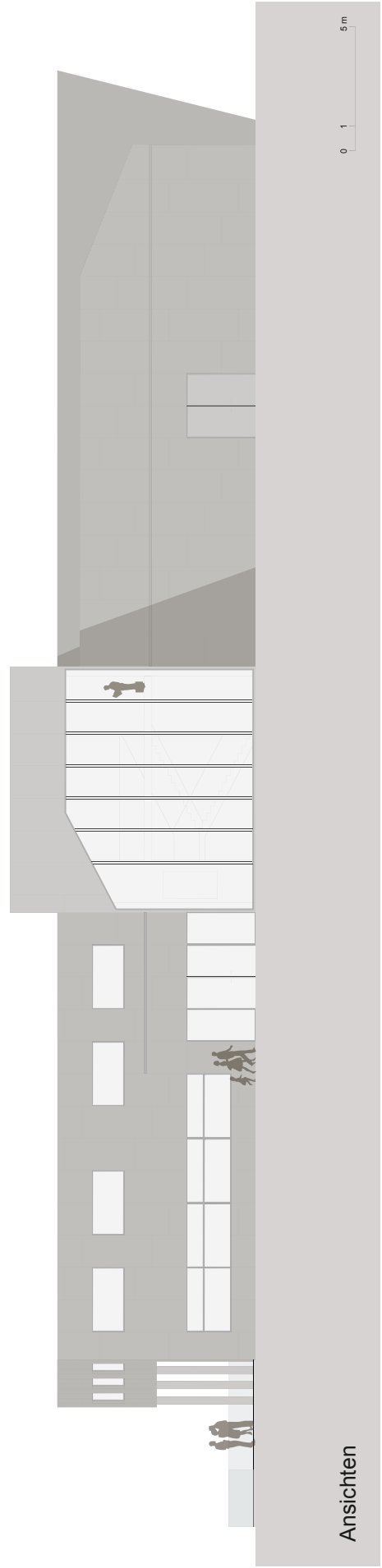
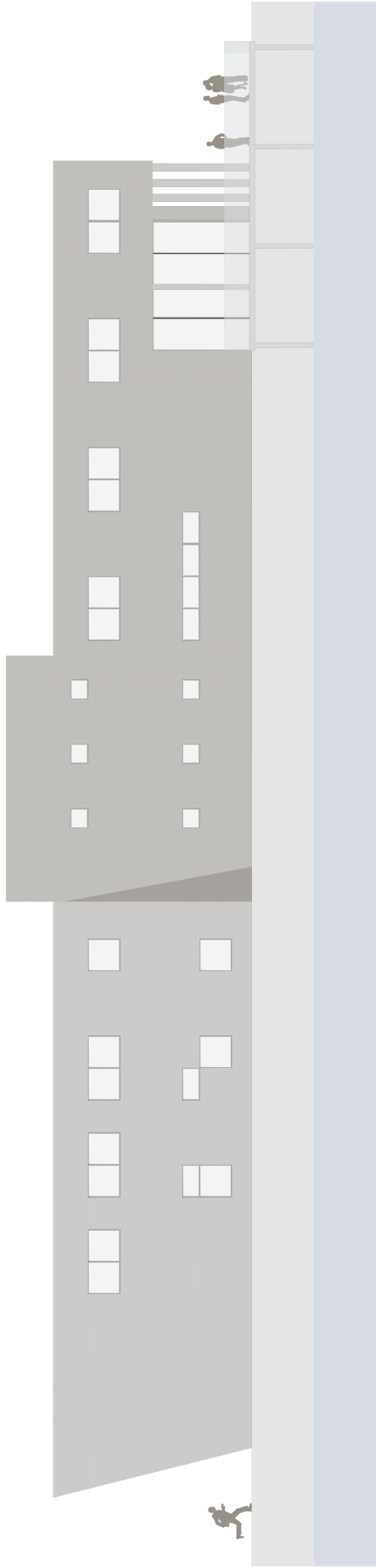
Alte Feuerwehr

- 1 Foyer
- 2 Kassa/Garderobe
- 3 Konzertsaal
- 4 Hinterbühne
- 5 Proberaum
- 6 Café
- 7 Ausstellungsraum
- 8 Künstlergarderobe
- 9 Lagerraum
- 10 Technikraum



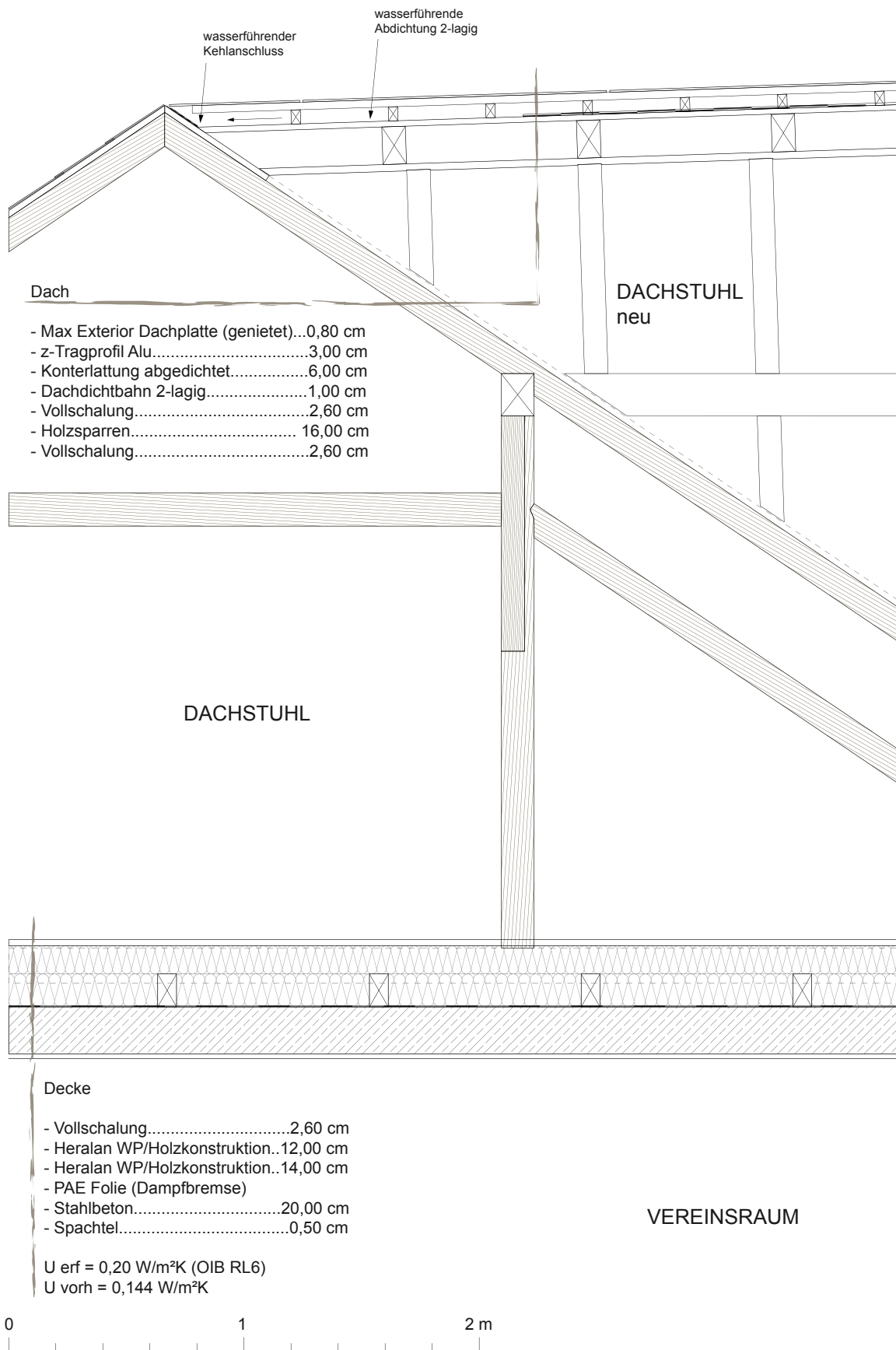
a-a

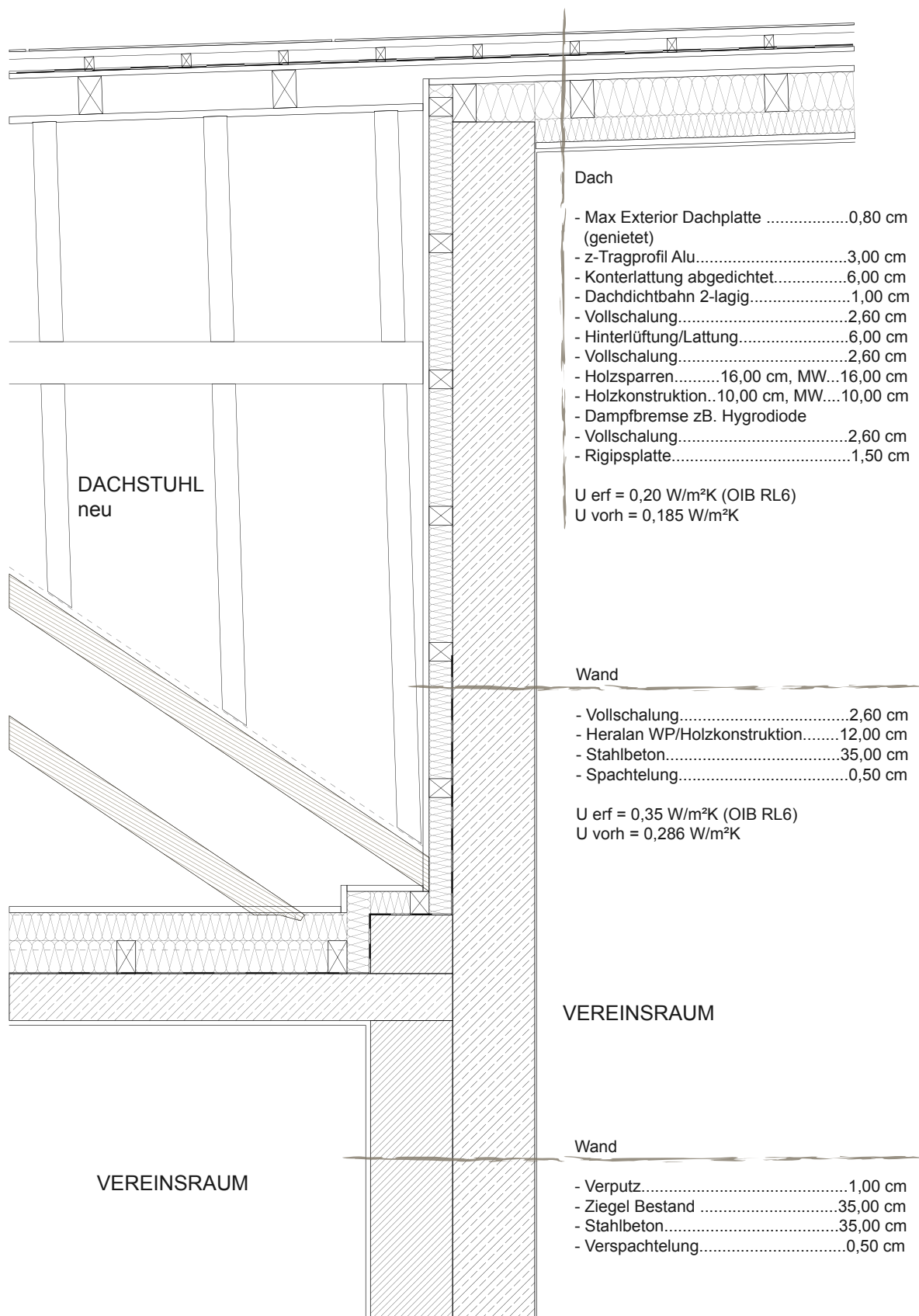
Alte Feuerwehr



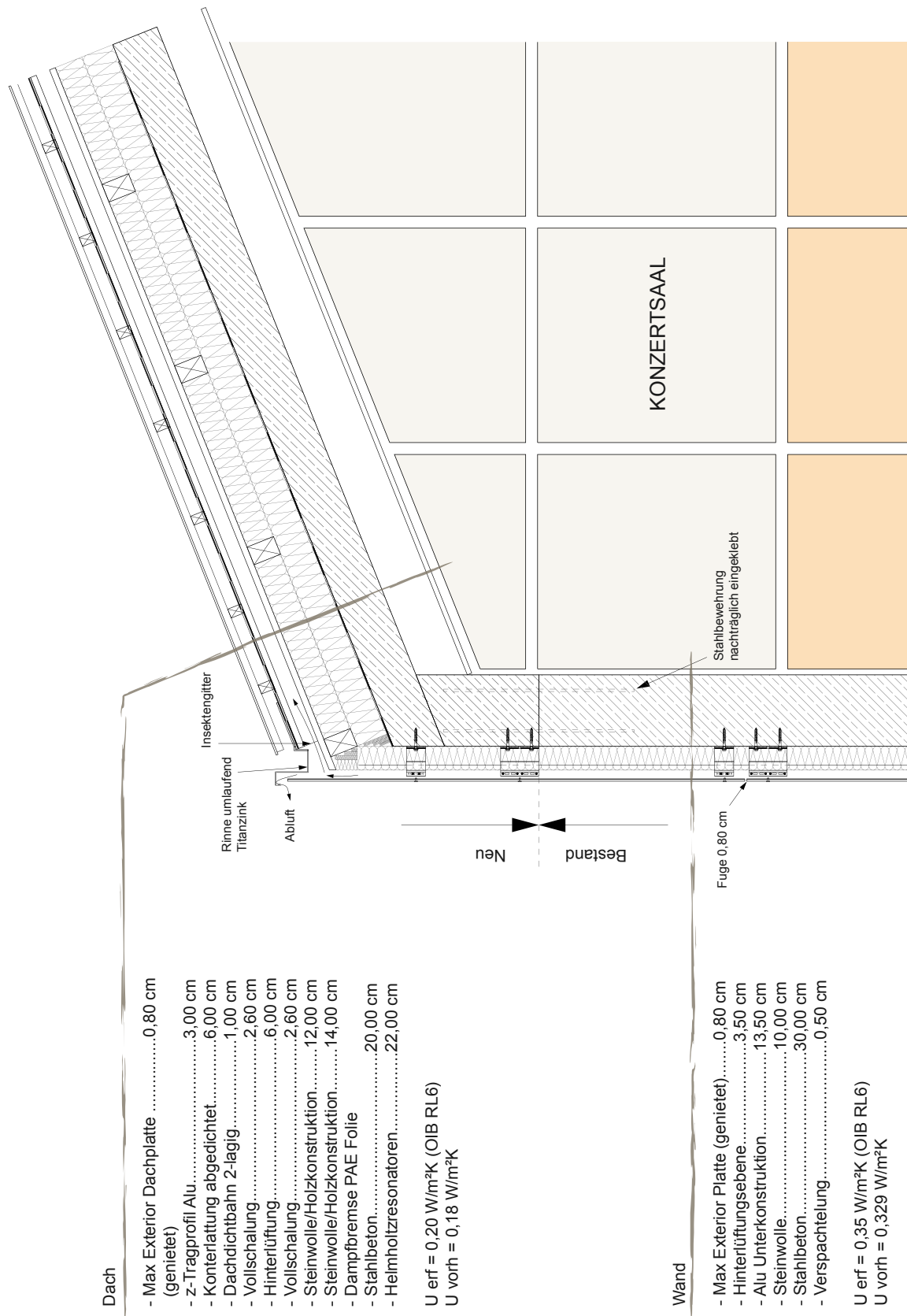
3.9 Details

Detail A

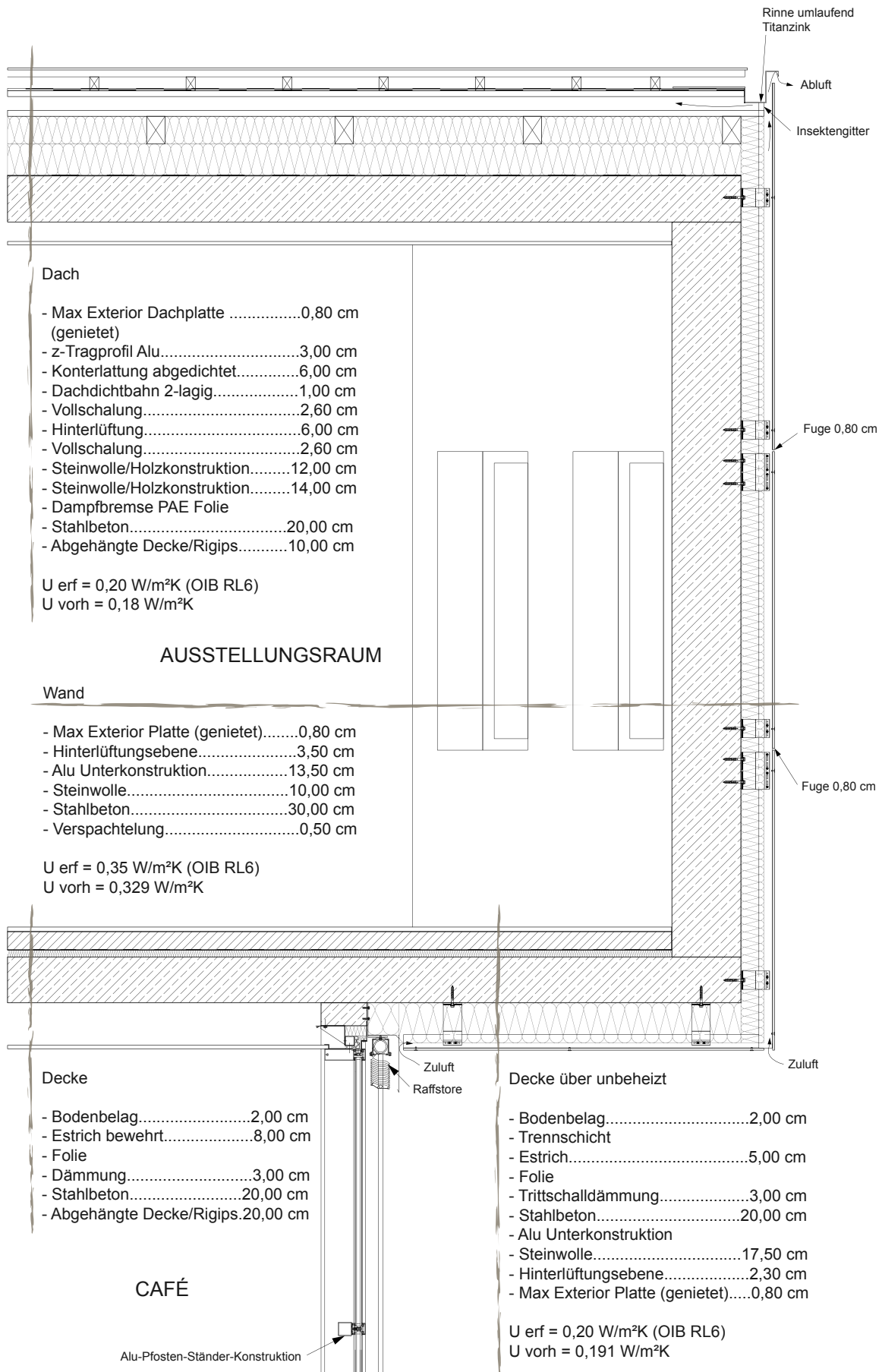


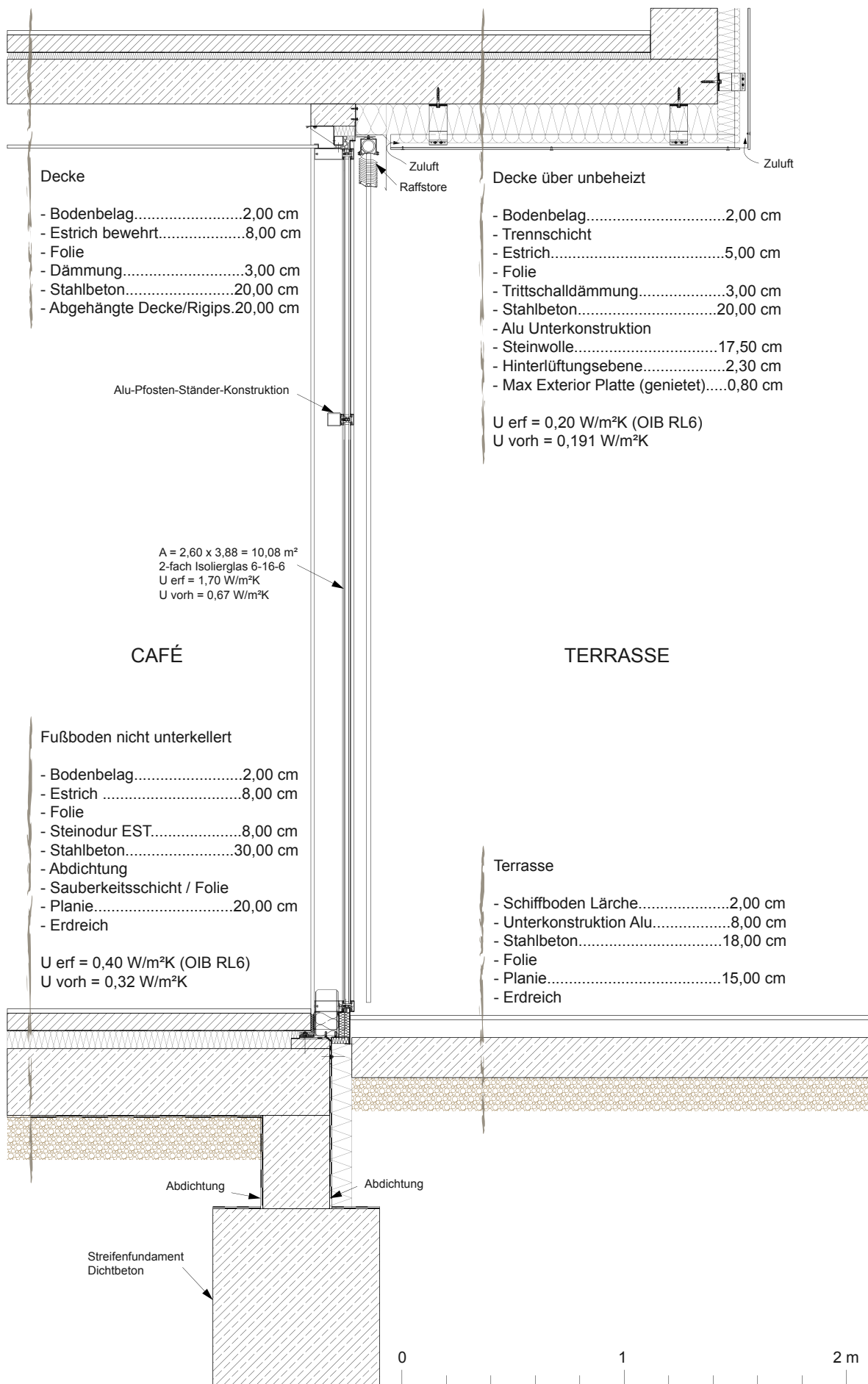


Detail B

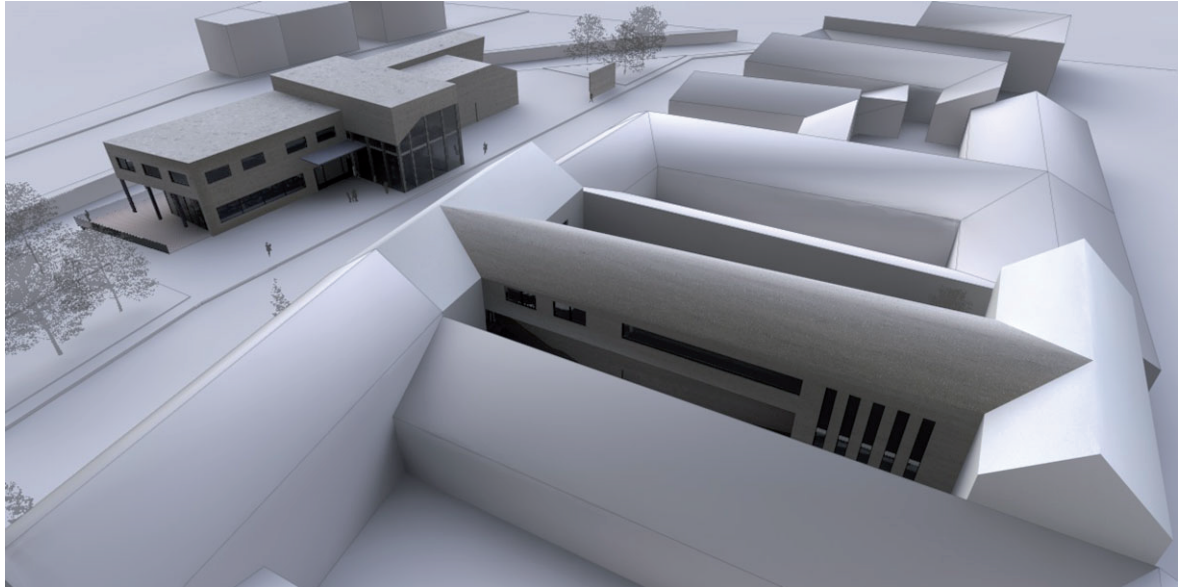


Detail C

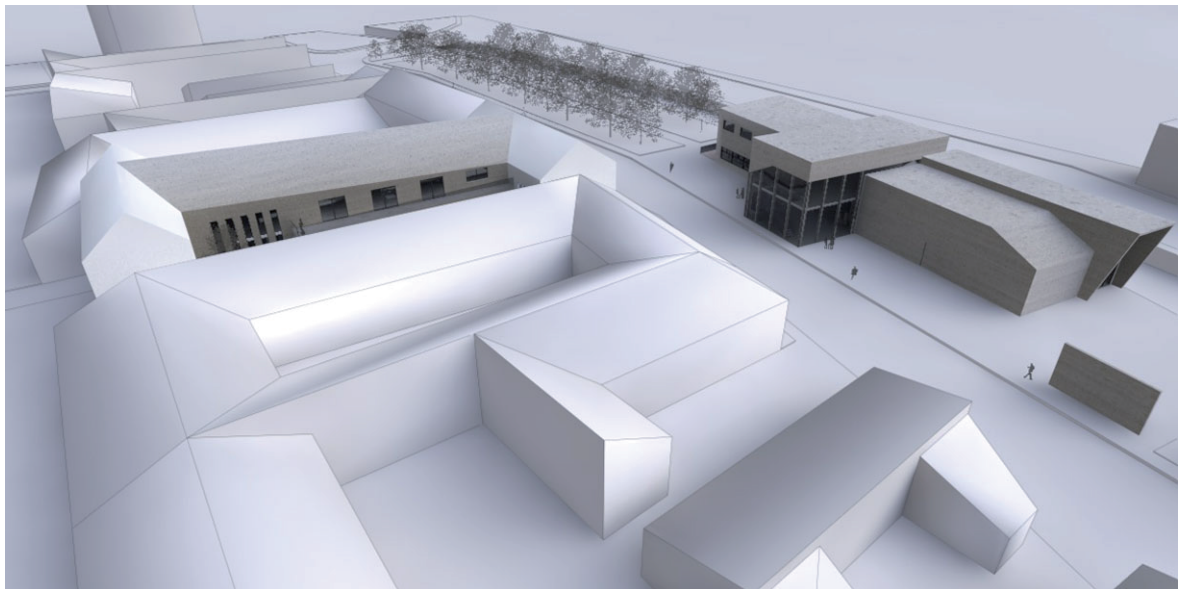




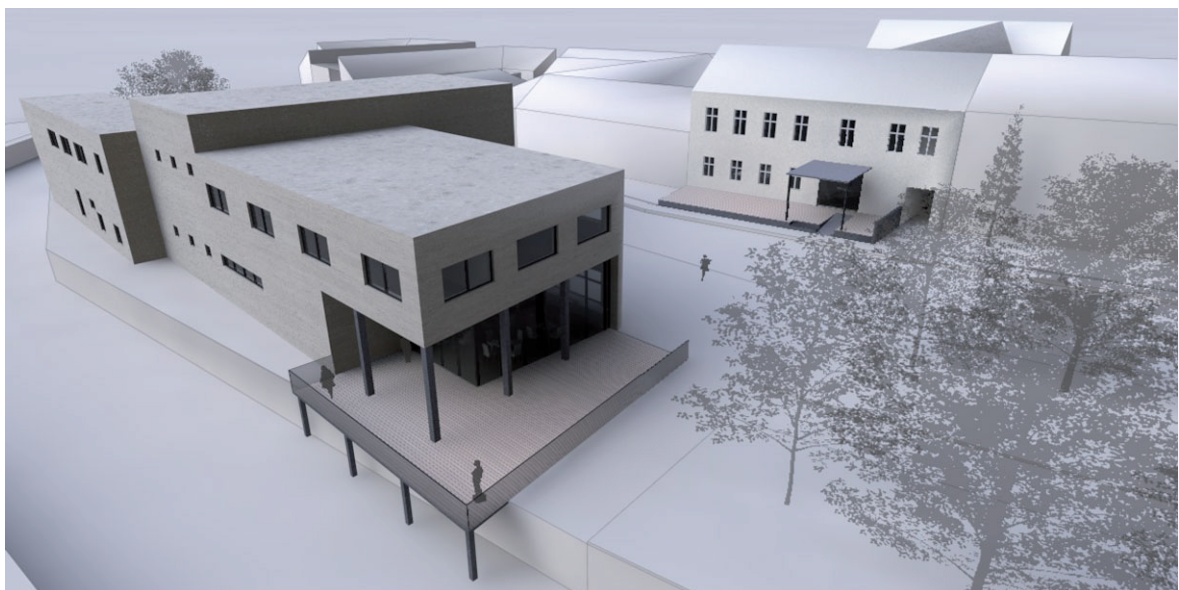
3.10 3D-Visualisierungen



Ansicht Nord-Ost



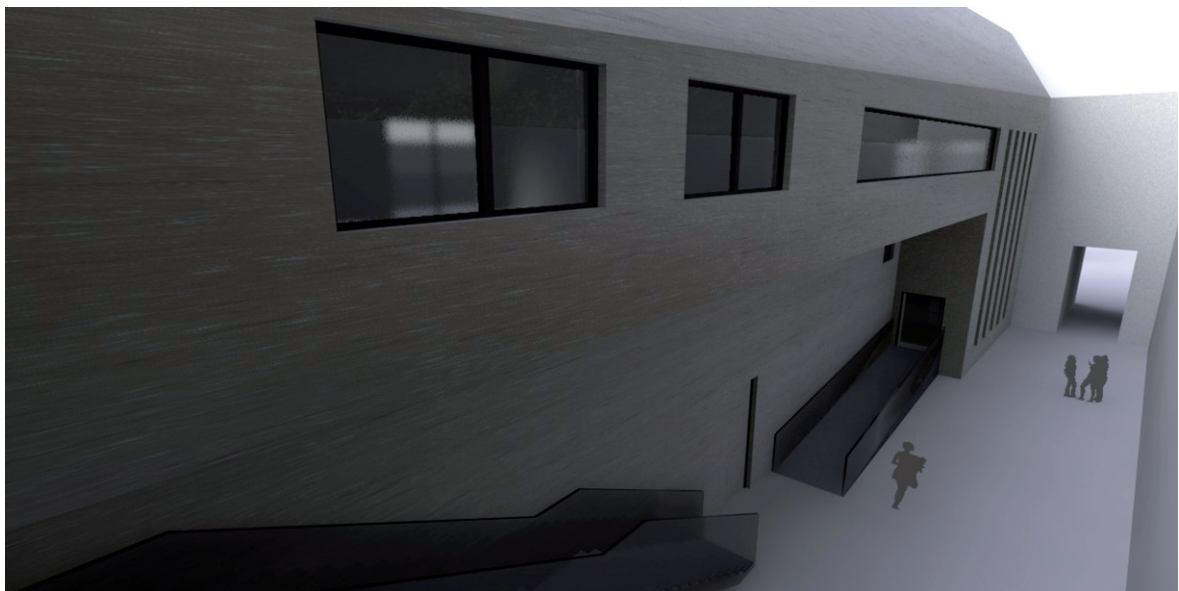
Ansicht Nord-West



Ansicht Süd-Ost



Alte Volksschule, Frontfassade



Alte Volksschule, Durchgang



Alte Volksschule, Hof



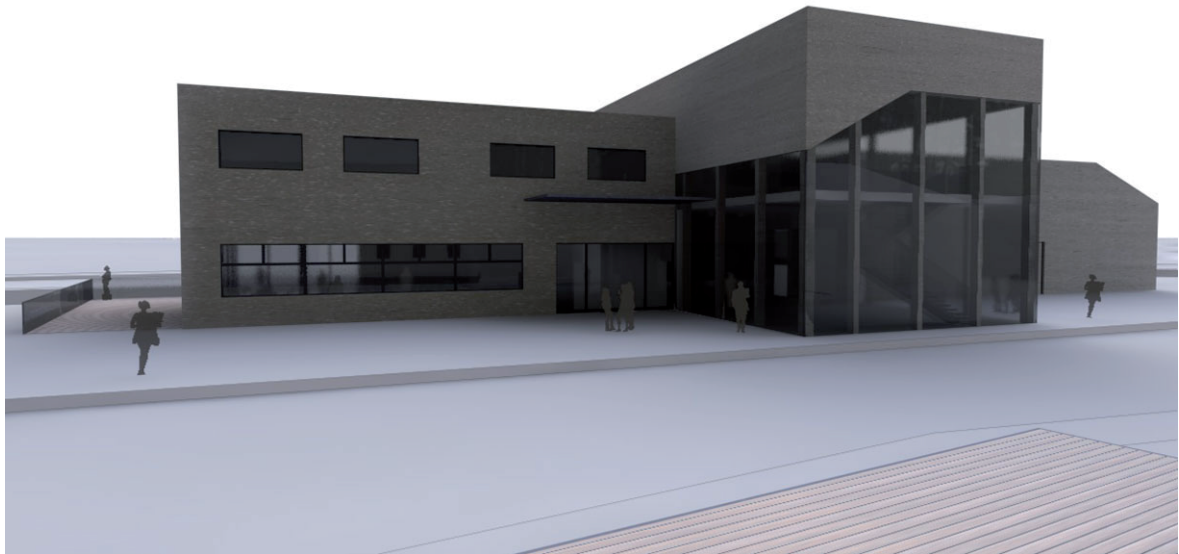
Alte Volksschule, Foyer



Alte Volksschule, Künstlerwohnung



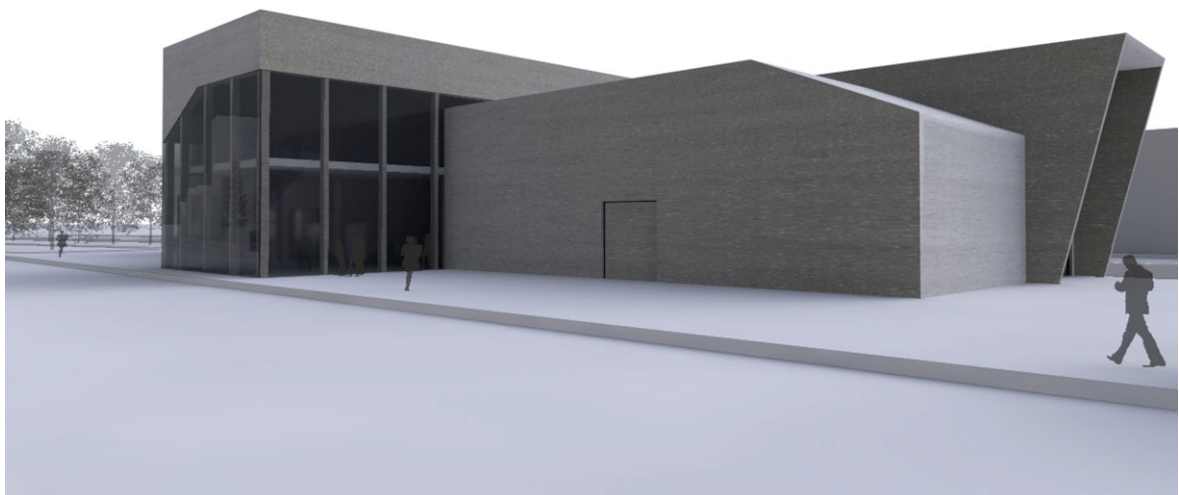
Alte Volksschule, Theatersaal



Alte Feuerwehr, Eingang und Foyer



Alte Feuerwehr, Terrasse und Eingang



Alte Feuerwehr, Konzertsaal



Alte Feuerwehr, Ansicht Süd-West



Alte Feuerwehr, Ansicht Süd-Ost



Alte Feuerwehr, Foyer



Alte Feuerwehr, Café



Alte Feuerwehr, Konzertsaal

Schlussbemerkung

Die angeführten Beispiele in Kapitel 1 verdeutlichen, dass Architektur und Akustik lange Zeit in einer Wechselbeziehung standen, sich aber diese Bindung immer mehr löste. Der Grund dafür ist der allgemeine Wissensstand über raumakustische Prinzipien zur jeweiligen Epoche. Die Schuhschachtelform stand stets als Synonym für ausgezeichnete Klanggüte und wurde deswegen in der Geschichte oft kopiert, ohne über die genauen Zusammenhänge von Raumform, -volumen und Materialien oder über die Abläufe von Reflexion und Absorption bescheid zu wissen. Auch heute noch umgibt die renommierten rechteckförmigen Konzertsäle eine besondere Aura. Dennoch darf nicht übersehen werden, dass es ebenso akustisch minderwertige Konzertsäle in Rechteckform gab, die aber im Laufe der Zeit aussortiert wurden. Was folglich bestehen blieb, hatte Qualität.

Das 20. Jahrhundert zeigt ein steigendes Interesse an der Raumakustik, die sich im Laufe dieses Jahrhunderts zu einer angesehenen Wissenschaft entwickelt. Hier wird nun die Relevanz der Raumakustik für die Konzertsaalentwicklung am deutlichsten. Vor dem 20. Jahrhundert bedingte die Architektur ausschließlich die Akustik, was zu einer breiten Streuung an guten und schlechten Klangergebnissen führte. Nur die glücklichen Ausnahmen wie z.B. der Wiener Musikverein überdauerten diese Epoche und zählen heute zu den besten ihrer Art. Die Boston Symphony Hall stellt den Wendepunkt zwischen Kopie (in diesem Fall des erste Neue Gewandhauses in Leipzig) und Originalität dar. Es erfolgen erstmals raumakustische Berechnungen, die Einfluss auf den Entwurf nehmen. Die Verbindung zwischen Akustik und Architektur scheint nun mithilfe von Wallace Sabine und der Nachhallzeit geklärt zu sein.

Mit der fortschreitenden Entwicklung auf dem Gebiet der Raumakustik und deren vermeintlicher Entmystifizierung wird in einer nächsten euphorischen Phase versucht, die Abhängigkeit umzukehren. Die Akustik erhält einen höheren Stellenwert und soll die Architektur bedingen. Zuweilen scheiterte dieses Vorhaben wie z.B. beim Salle Pleyel, konnte aber durchaus auch gelingen wie z.B. bei der Berliner Philharmonie. Diese Phase ist geprägt vom Ausbruch aus der Rechteckform und von der Experimentierfreudigkeit und Vielfalt an Konzertsälen.

In Kapitel 2 wird deutlich, dass der heutige Wissenstand eine Trennung der Akustik von der Architektur erlaubt. Primär- und Sekundärstruktur können, auch wenn es nicht zu empfehlen ist, unabhängig voneinander geplant werden und trotzdem zu guten Klangergebnissen führen. Es bleibt alleinig eine Kostenfrage. Wirtschaftliche Überlegungen waren auch schon bisher einer der gravierendsten Ursachen für die Minderung der Klanggüte von Konzertsälen wie z.B. bei der Avery Fisher Hall. Vergrößerte Auditorien, weit auskra-

gende Balkone und erhöhter Publikumsbedarf waren Maßnahmen, die vor einiger Zeit noch den klanglichen Todesstoß für einen Konzertsaal bedeuteten, aber heutzutage mit den akustischen Anforderungen in Einklang gebracht werden können, zumal man dazu bereit ist.

Denn es scheint, dass die Raumakustik zwar die verdiente Aufmerksamkeit erhalten hat, sich aber trotzdem ihren Stellenwert erkämpfen bzw. sich anderen Faktoren wie z.B. Ästhetik, Raumprogramm und Wirtschaftlichkeit unterordnen muss. Grund dafür ist eben jene Trennung von Architektur und Akustik. Denn heute gibt es eine Vielzahl von technischen Methoden, die bei nötigen raumakustischen Maßnahmen angewandt werden können, weshalb in der Entwurfsphase nur geringe Rücksicht auf die Raumakustik genommen werden kann. Die Akustik fristet auch heute noch ein Schattendasein, und welche Relevanz ihr für einen Entwurf zugeschrieben wird, muss von Fall zu Fall abgewogen werden. Die geschichtliche Entwicklung der Konzertsäle und der allgemeine technologische Fortschritt im 20. Jahrhundert hat zumindest das Bewusstsein für die Raumakustik geweckt, sodass es heute möglich ist, ihren Stellenwert gegenüber anderen Faktoren abzuwägen.

Das zeigt sich auch symptomatisch beim Entwurf der beiden Mehrzweckbauten in Kapitel 3, wo das üppige Raumprogramm und die beschränkten räumlichen Gegebenheiten den akustischen Anspruch zusätzlich erschweren. Hier überwiegen die Ästhetik, der geschichtlicher Kontext und das Raumprogramm gegenüber der Akustik, doch es ist letzten Endes dem heutigen Wissensstand auf dem Gebiet der Raumakustik zu verdanken, dass die klangliche Qualität nicht darunter leiden und in einem durchaus akzeptablen bis sehr guten Bereich liegen wird.

Literaturverzeichnis

- ALBRECHT, Siegfried, *Teatro – eine Reise zu den oberitalienischen Theatern des 16.–19. Jahrhunderts*, Marburg (Jonas Verlag) 2001
- APPLETON, Ian, *Buildings for the performing arts – A design and development guide*, Oxford (Butterworth-Heinemann) 1996
- BERANEK, Leo, *Music, acoustics & architecture*, New York (Wiley) 1962
- BERANEK, Leo, *Concert halls and opera houses – Music, acoustics, and architecture*, New York (Springer) 2004
- BRETON, Galle, *Theater*, Stuttgart (Krämer) 1991
- FASOLD, Wolfgang, *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis – Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen*, Berlin (Verlag Bauwesen) 2003
- FORSYTH, Michael, *Bauwerke für Musik – Konzertsäle und Opernhäuser, Musik und Zuhörer vom 17. Jahrhundert bis zur Gegenwart*, München (Saur) 1992
- FUCHS, Helmut V., *Schallabsorber und Schalldämpfer – innovative akustische Konzepte und Bauteile mit praktischen Anwendungen in konkreten Beispielen*, Berlin (Springer) 2007
- GRAUBNER, Gerhard, *Theaterbau. Aufgabe und Planung*, München (Callwey) 1968
- GRUENEISEN, Peter, *Soundspace – Architektur für Ton und Bild*, Basel (Birkhäuser) 2003
- IZENOUR, George C., *Theater design*, New York (McGraw-Hill) 1977
- JANETSCHEK, Kurt, *Wiener Neudorf – Im Wandel der Zeit*, Wiener Neudorf 1978
- JANETSCHEK, Kurt, *Unser Neudorf – Mitteilungen des Archivs der Marktgemeinde Wiener Neudorf*, Wiener Neudorf 2001–2010
- LINHARDT, Achim, *Handbuch Umbau und Modernisierung – Planen – Kalkulieren – Ausführen*, Köln (Müller) 2008
- PAPPALARDO, Umberto, *Antike Theater – Architektur, Kunst und Dichtung der Griechen und Römer*, Petersburg (Imhof) 2007

Bauteilliste

Konzerthalle Umbau

0401

Beton-Dachschräge 4/1

Neubau

AD

O-U, Betonkonstruktion

			d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
1		Profilholzschalung	0,0260	0,130	0,200
2	90,0%	Mineralfaser Steinw. (40)	0,1200	0,040	3,000
	10,0%	Holz (R = 700)	0,1200	0,170	0,706
3	90,0%	Mineralfaser Steinw. (40)	0,1400	0,040	3,500
	10,0%	Holz (R = 700)	0,1400	0,170	0,824
4		PAE-Folie	0,0002	0,230	0,001
5		Beton (R = 1600)	0,2000	0,980	0,204
Wärmeübergangswiderstände					0,140
R _{TO} =5,684 m ² K/W; R _{TU} =5,451 m ² K/W;			0,4860	RT =	5,567
					U = 0,180

0401

Dachschräge 4/1

Neubau

AD

O-U, Holzkonstruktion

			d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
1		Profilholzschalung	0,0260	0,130	0,200
2	87,8%	Mineralfaser Steinw. (40)	0,1600	0,040	4,000
	12,2%	Holz (R = 700)	0,1600	0,170	0,941
3	87,8%	Mineralfaser Steinw. (40)	0,1000	0,040	2,500
	12,2%	Holz (R = 700)	0,1000	0,170	0,588
4		Hygrodiode	0,0004	0,230	0,002
5		Profilholzschalung	0,0260	0,130	0,200
6		Gipskarton Feuerschutzplatte imprägniert	0,0150	0,250	0,060
Wärmeübergangswiderstände					0,140
R _{TO} =5,529 m ² K/W; R _{TU} =5,257 m ² K/W;			0,3270	RT =	5,393
					U = 0,185

Glasfassade

Neubau

AF

	Länge	psi	g	Fläche	%	U
	m	W/m	-	m ²		W/m ² K
2-fach-Isolierglas Klarglas (6-8-6)			0,710	2,02	20,00	3,20
Rahmen				8,06	80,00	
Glasrandverbund	5,46	0,060				
				vorh.	10,08	0,67

Bauteilliste

Konzerthalle Umbau

0019**Betonwand zu Dachstuhl**

Neubau

AW

A-I

		d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
1	Holzschalung roh	0,0260	0,150	0,173
2	Heralan WP (12cm)	0,1200	0,040	3,000
3	Stahlbeton-Wand	0,3500	2,300	0,152
4	Spachtelung	0,0100	1,400	0,007
	Wärmeübergangswiderstände			0,170
		0,5060	RT =	3,502
			U =	0,286

2008**Aussenwand 30 STB+10 MW**

Neubau

AW

A-I

		d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
1	Heralan PTP-S 035 (10cm)	0,1000	0,036	2,750
2	Stahlbeton (R = 2400)	0,3000	2,500	0,120
3	Spachtelung	0,0050	1,400	0,004
	Wärmeübergangswiderstände			0,170
		0,4050	RT =	3,044
			U =	0,329

2008**Aussenwand 30 STB+10 XPS**

Neubau

AW

A-I

		d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
1	XPS mit Bodenkontakt (34)	0,1000	0,038	2,632
2	bituminöse Abdichtungsbahn (3mm)	0,0030	0,170	0,018
3	Stahlbeton (R = 2400)	0,3000	2,500	0,120
4	Spachtelung	0,0050	1,400	0,004
	Wärmeübergangswiderstände			0,170
		0,4080	RT =	2,944
			U =	0,340

0029**Fußboden über Terrasse**

Neubau

DD

U-O

		d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
1	Tektalan-SD (17,5cm)	0,1750	0,046	3,750
2	Stahlbeton-Decke (20cm)	0,2000	2,300	0,087
3	Trittschall-Dämmplatte TPS 35	0,0350	0,035	1,000
4	Trennschicht	0,0003	0,230	0,001
5	Estrich (Beton-)	0,0800	1,400	0,057
6	Trennschicht	0,0020	0,230	0,009
7	Parkettboden	0,0200	0,170	0,118
	Wärmeübergangswiderstände			0,210
		0,5120	RT =	5,232
			U =	0,191

Bauteilliste

Konzerthalle Umbau

0024**Decke gegen Dachboden unbeheizt**

Neubau

DGD

O-U

		d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
1	Holzschalung roh	0,0200	0,150	0,133
2	Heralan WP (12cm)	0,1200	0,040	3,000
3	Heralan WP (14cm)	0,1400	0,040	3,500
4	PAE-Folie	0,0002	0,230	0,001
5	Stahlbeton-Decke (20cm)	0,2000	2,300	0,087
6	Spachtelung	0,0050	1,400	0,004
	Wärmeübergangswiderstände			0,200
		0,4850	RT =	6,925
			U =	0,144

0021**Decke gegen Erdreich**

Neubau

EBu

U-O

		d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
1	Feinplanum	0,2000	0,700	0,286
2	Stahlbeton (R = 2400)	0,3000	2,300	0,130
3	steinodur EST (80mm)	0,0800	0,035	2,286
4	steinophon 300 - 3mm	0,0030	0,045	0,067
5	Estrich (Beton-)	0,0800	1,400	0,057
6	Parkett - Hartholzklebeparkett (geklebt)	0,0200	0,150	0,133
	Wärmeübergangswiderstände			0,170
		0,6830	RT =	3,129
			U =	0,320

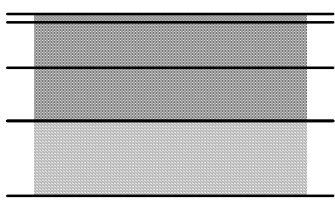
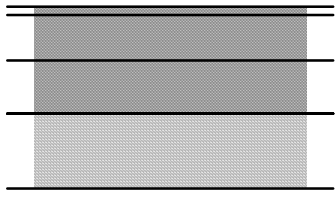
Nachweis des Wärmeschutzes

OIB Richtlinie 6:2007 (ON 2010)

U-Wert von zusammengesetzten Bauteilen

Objekt Konzerthalle Umbau	Verfasser der Unterlagen
Auftraggeber Firma/Nachname	AQ NULL

Bauteilbezeichnung Beton-Dachschräge 4/1 Holzkonstruktion	Bauteil Nr. 0401
Bauteiltyp Außendecke	AD
Wärmedurchgangskoeffizient Wärmedurchgangswiderstand Oberer Grenzwert R'_T Unterer Grenzwert R''_T	U-Wert 0,18 W/(m²K) 5,684 [m²K/W] 5,451 [m²K/W]
	erforderlich 0,20 W/(m ² K)

Bauteilbezeichnung Beton-Dachschräge 4/1 Dämm	Bauteil Nr. 0401	
Bauteiltyp Außendecke	AD	
Wärmedurchgangskoeffizient	0,142 W/(m²K)	
Anteil	90,0000 [-]	
Prozent	90,00 [%]	
Bauteilbezeichnung Beton-Dachschräge 4/1 Sparr	Bauteil Nr. 0401	
Bauteiltyp Außendecke	AD	
Wärmedurchgangskoeffizient	0,482 W/(m²K)	
Anteil	10,0000 [-]	
Prozent	10,00 [%]	
Bauteilbezeichnung	Bauteil Nr.	
Bauteiltyp		
Wärmedurchgangskoeffizient		
Anteil	[-]	
Prozent	[%]	
Bauteilbezeichnung	Bauteil Nr.	
Bauteiltyp		
Wärmedurchgangskoeffizient		
Anteil	[-]	
Prozent	[%]	

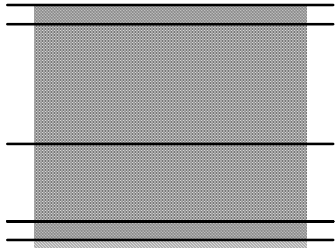
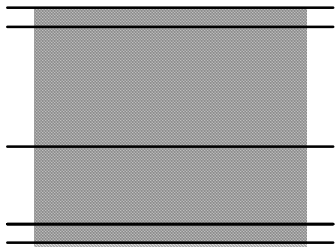
Nachweis des Wärmeschutzes

OIB Richtlinie 6:2007 (ON 2010)

U-Wert von zusammengesetzten Bauteilen

Objekt Konzerthalle Umbau Auftraggeber Firma/Nachname	Verfasser der Unterlagen 
--	--

Bauteilbezeichnung Dachschräge 4/1 Holzkonstruktion	Bauteil Nr. 0401
Bauteiltyp Außendecke	AD
Wärmedurchgangskoeffizient Wärmedurchgangswiderstand Oberer Grenzwert R'_T Unterer Grenzwert R''_T	U-Wert 0,19 W/(m²K) 5,529 [m²K/W] 5,257 [m²K/W]
	erforderlich 0,20 W/(m²K)

Bauteilbezeichnung Dachschräge 4/1 Dämm	Bauteil Nr. 0401	
Bauteiltyp Außendecke	AD	
Wärmedurchgangskoeffizient 0,141 W/(m²K)		
Anteil 87,80000 [-]		
Prozent 87,80 [%]		
Bauteilbezeichnung Dachschräge 4/1 Sparr	Bauteil Nr. 0401	
Bauteiltyp Außendecke	AD	
Wärmedurchgangskoeffizient 0,469 W/(m²K)		
Anteil 12,20000 [-]		
Prozent 12,20 [%]		
Bauteilbezeichnung Bauteiltyp Wärmedurchgangskoeffizient Anteil [-] Prozent [%]	Bauteil Nr. 	
Bauteilbezeichnung Bauteiltyp Wärmedurchgangskoeffizient Anteil [-] Prozent [%]	Bauteil Nr. 	

Fenster

Konzerthalle Umbau

Glasfassade

Neubau

AF

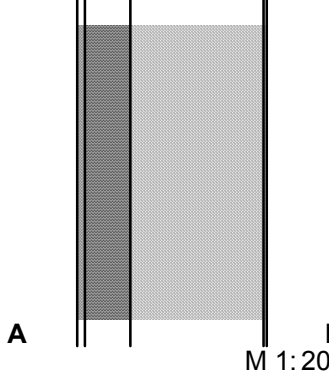
	Länge	psi	g	Fläche	%	U
	m	W/m	-	m2		W/m2K
2-fach-Isolierglas Klarglas (6-8-6)			0,710	2,02	20,00	3,20
Rahmen				8,06	80,00	
Glasrandverbund	5,46	0,060				
			vorh.	10,08		0,67
Schallschutz					bew. Schalldämmmaß	Rw
						dB
			vorh.			
			erf.			33
Frei - Prozent						
	A_w			Fenster	10,08	m2
	I_g_01			Verbund	5,46	m
	p_g			Glasanteil	20,00	%

Nachweis des Wärmeschutzes

OIB Richtlinie 6:2007 (ON 2010)

U-Wert von opaken Bauteilen

Objekt Konzerthalle Umbau Auftraggeber Firma/Nachname	Verfasser der Unterlagen 
--	---

Bauteilbezeichnung Betonwand zu Dachstuhl	Bauteil Nr. 0019	
Bauteiltyp Außenwand	AW	
Wärmedurchgangskoeffizient U-Wert 0,29 [W/(m²K)]		
erforderlich 0,35 [W/(m²K)]		

Konstruktionsaufbau und Berechnung								
	Baustoffschichten	ID	berücksichtigen	d	λ	$R = d/\lambda$		$\rho \cdot d$
	von außen nach innen			Dicke	Leitfähigkeit	Durchlassw.	Dichte	Flächengewicht
Nr	Bezeichnung	kurz		[m]	[W/m K]	[m²K/W]	[kg/m³]	[kg/m²]
1	Holzschalung roh	WSK	☒	0,0260	0,150	0,173	600,0	15,6
2	Heralan WP (12cm)		☒	0,1200	0,040	3,000	30,0	3,6
3	Stahlbeton-Wand	WSK	☒	0,3500	2,300	0,152	2.400,0	840,0
4	Spachtelung	WSK	☒	0,0100	1,400	0,007	2.100,0	21,0
Dicke des Bauteils				0,506				
Flächenbezogene Masse des Bauteils							880,2	
Summe der Wärmedurchlasswiderstände $\sum R_t$						3,332	[m²K/W]	

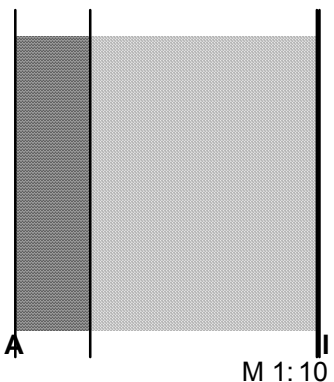
		R_{si}, R_{se}	
		Koeffizient	Widerstand
Wärmeübergangskoeffizient/widerstand	innen	7,692	0,130
Wärmeübergangskoeffizient/widerstand	außen	25,000	0,040
Summe der Wärmeübergangswiderstände	$R_{si} + R_{se}$	0,170	[m²K/W]
Wärmedurchgangswiderstand	$R_T = R_{si} + \sum R_t + R_{se}$	3,502	[m²K/W]
Wärmedurchgangskoeffizient	$U = 1/R_T$	0,286	[W/(m²K)]

Nachweis des Wärmeschutzes

OIB Richtlinie 6:2007 (ON 2010)

U-Wert von opaken Bauteilen

Objekt Konzerthalle Umbau Auftraggeber Firma/Nachname	Verfasser der Unterlagen A NULL
--	--

Bauteilbezeichnung Aussenwand 30 STB+10 MW mit Wärmeschutzfassade	Bauteil Nr. 2008	
Bauteiltyp Außenwand	AW	
Wärmedurchgangskoeffizient U-Wert		

erforderlich
0,33 [W/(m²K)]

0,35 [W/(m²K)]

Konstruktionsaufbau und Berechnung								
	Baustoffschichten	ID	berücksichtigen	d	λ	$R = d/\lambda$		$\rho \cdot d$
	von außen nach innen			Dicke	Leitfähigkeit	Durchlassw.	Dichte	Flächengewicht
Nr	Bezeichnung	kurz		[m]	[W/m K]	[m²K/W]	[kg/m³]	[kg/m²]
1	Heralan PTP-S 035 (10cm)		☒	0,1000	0,036	2,750	115,0	11,5
2	Stahlbeton (R = 2400)	WSK	☒	0,3000	2,500	0,120	2.400,0	720,0
3	Spachtelung	WSK	☒	0,0050	1,400	0,004	2.100,0	10,5
Dicke des Bauteils				0,405				
Flächenbezogene Masse des Bauteils								742,0
Summe der Wärmedurchlasswiderstände $\sum R_t$						2,874	[m²K/W]	

		R_{si}, R_{se}	
		Koeffizient	Widerstand
Wärmeübergangskoeffizient/widerstand	innen	7,692	0,130
Wärmeübergangskoeffizient/widerstand	außen	25,000	0,040
Summe der Wärmeübergangswiderstände	$R_{si} + R_{se}$	0,170	[m²K/W]
Wärmedurchgangswiderstand	$R_T = R_{si} + \sum R_t + R_{se}$	3,044	[m²K/W]
Wärmedurchgangskoeffizient	$U = 1/R_T$	0,329	[W/(m²K)]

Nachweis des Wärmeschutzes

OIB Richtlinie 6:2007 (ON 2010)

U-Wert von opaken Bauteilen

Objekt

Konzerthalle Umbau

Auftraggeber

Firma/Nachname

Verfasser der Unterlagen



Bauteilbezeichnung

**Aussenwand 30 STB+10 XPS
mit Wärmeschutzfassade**

Bauteil Nr.

2008

Bauteiltyp

Außenwand

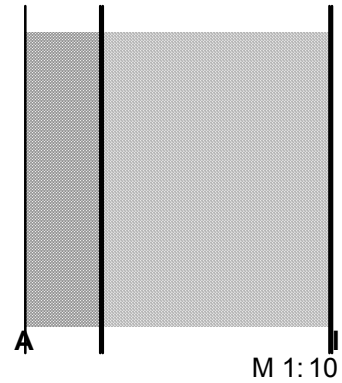
AW

**Wärmedurchgangskoeffizient
U-Wert**

0,34 [W/(m²K)]

erforderlich

0,35 [W/(m²K)]



Konstruktionsaufbau und Berechnung

Nr	Baustoffschichten	ID	berücksichtigen	d	λ	$R = d/\lambda$		$\rho \cdot d$
	von außen nach innen			Dicke	Leitfähigkeit	Durchlassw.	Dichte	Flächengewicht
	Bezeichnung	kurz		[m]	[W/m K]	[m²K/W]	[kg/m³]	[kg/m²]
1	XPS mit Bodenkontakt (34)	WSK	☒	0,1000	0,038	2,632	34,0	3,4
2	bituminöse Abdichtungsbahn (3mm)	WSK	☒	0,0030	0,170	0,018	1.200,0	3,6
3	Stahlbeton (R = 2400)	WSK	☒	0,3000	2,500	0,120	2.400,0	720,0
4	Spachtelung	WSK	☒	0,0050	1,400	0,004	2.100,0	10,5

Dicke des Bauteils

0,408

Flächenbezogene Masse des Bauteils

737,5

Summe der Wärmedurchlasswiderstände

$\sum R_t$

2,774

[m²K/W]

		R_{si}, R_{se}	
		Koeffizient	Widerstand
Wärmeübergangskoeffizient/widerstand	innen	7,692	0,130
Wärmeübergangskoeffizient/widerstand	außen	25,000	0,040
Summe der Wärmeübergangswiderstände	$R_{si} + R_{se}$	0,170	[m²K/W]
Wärmedurchgangswiderstand	$R_T = R_{si} + \sum R_t + R_{se}$	2,944	[m²K/W]
Wärmedurchgangskoeffizient	$U = 1/R_T$	0,340	[W/(m²K)]

Nachweis des Wärmeschutzes

OIB Richtlinie 6:2007 (ON 2010)

U-Wert von opaken Bauteilen

Objekt Konzerthalle Umbau Auftraggeber Firma/Nachname	Verfasser der Unterlagen A O NULL
--	--

Bauteilbezeichnung Fußboden über Terrasse	Bauteil Nr. 0029	O  U M 1:20
Bauteiltyp Decke üb Durchfahrt	DD	
Wärmedurchgangskoeffizient U-Wert 0,19 [W/(m²K)]		
erforderlich 0,20 [W/(m²K)]		

Konstruktionsaufbau und Berechnung								
	Baustoffschichten	ID	berücksichtigen	d	λ	$R = d/\lambda$		$\rho \cdot d$
	von außen nach innen			Dicke	Leitfähigkeit	Durchlassw.	Dichte	Flächengewicht
Nr	Bezeichnung	kurz		[m]	[W/m K]	[m²K/W]	[kg/m³]	[kg/m²]
1	Tektalan-SD (17,5cm)		☒	0,1750	0,046	3,750	164,5	28,8
2	Stahlbeton-Decke (20cm)		☒	0,2000	2,300	0,087	2.400,0	480,0
3	Trittschall-Dämmplatte TPS 35		☒	0,0350	0,035	1,000	115,0	4,0
4	Trennschicht	WSK	☒	0,0003	0,230	0,001	1.500,0	0,4
5	Estrich (Beton-)		☒	0,0800	1,400	0,057	2.000,0	160,0
6	Trennschicht		☒	0,0020	0,230	0,009	1.500,0	3,0
7	Parkettboden		☒	0,0200	0,170	0,118	700,0	14,0
Dicke des Bauteils				0,512				
Flächenbezogene Masse des Bauteils							690,2	
Summe der Wärmedurchlasswiderstände $\sum R_t$						5,022	[m²K/W]	

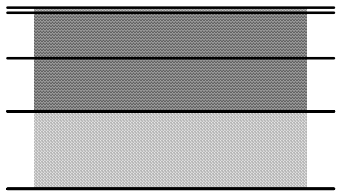
		R_{si}, R_{se}		
		Koeffizient	Widerstand	
Wärmeübergangskoeffizient/widerstand	innen	5,882	0,170	
Wärmeübergangskoeffizient/widerstand	außen	25,000	0,040	
Summe der Wärmeübergangswiderstände		$R_{si} + R_{se}$		0,210 [m²K/W]
Wärmedurchgangswiderstand		$R_T = R_{si} + \sum R_t + R_{se}$		5,232 [m²K/W]
Wärmedurchgangskoeffizient		$U = 1/R_T$		0,191 [W/(m²K)]

Nachweis des Wärmeschutzes

OIB Richtlinie 6:2007 (ON 2010)

U-Wert von opaken Bauteilen

Objekt Konzerthalle Umbau Auftraggeber Firma/Nachname	Verfasser der Unterlagen A NULL
--	---

Bauteilbezeichnung Decke gegen Dachboden unbeheizt	Bauteil Nr. 0024	
Bauteiltyp Decke gg ungedämmten Dachraum	DGD	
Wärmedurchgangskoeffizient U-Wert 0,14 [W/(m²K)]		
erforderlich 0,20 [W/(m²K)]		U M 1:20

Konstruktionsaufbau und Berechnung								
	Baustoffschichten	ID	berücksichtigen	d	λ	R = d/λ		ρ * d
	von außen nach innen			Dicke	Leitfähigkeit	Durchlassw.	Dichte	Flächengewicht
Nr	Bezeichnung	kurz		[m]	[W/m K]	[m²K/W]	[kg/m³]	[kg/m²]
1	Holzschalung roh	WSK	☒	0,0200	0,150	0,133	600,0	12,0
2	Heralan WP (12cm)		☒	0,1200	0,040	3,000	30,0	3,6
3	Heralan WP (14cm)		☒	0,1400	0,040	3,500	30,0	4,2
4	PAE-Folie	WSK	☒	0,0002	0,230	0,001	1.500,0	0,3
5	Stahlbeton-Decke (20cm)	WSK	☒	0,2000	2,300	0,087	2.400,0	480,0
6	Spachtelung	WSK	☒	0,0050	1,400	0,004	2.100,0	10,5
Dicke des Bauteils				0,485				
Flächenbezogene Masse des Bauteils							510,6	
Summe der Wärmedurchlasswiderstände $\sum R_t$						6,725	[m²K/W]	

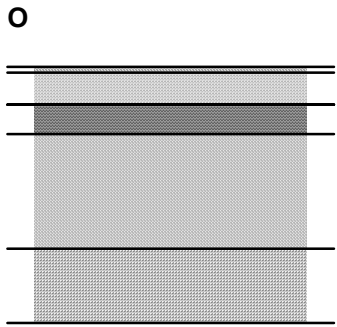
		R _{si} , R _{se}	
		Koeffizient	Widerstand
Wärmeübergangskoeffizient/widerstand	innen	10,000	0,100
Wärmeübergangskoeffizient/widerstand	außen	10,000	0,100
Summe der Wärmeübergangswiderstände	R _{si} + R _{se}	0,200	[m²K/W]
Wärmedurchgangswiderstand	R _T = R _{si} + ΣR _t + R _{se}	6,925	[m²K/W]
Wärmedurchgangskoeffizient	U = 1/R _T	0,144	[W/(m²K)]

Nachweis des Wärmeschutzes

OIB Richtlinie 6:2007 (ON 2010)

U-Wert von opaken Bauteilen

Objekt Konzerthalle Umbau Auftraggeber Firma/Nachname	Verfasser der Unterlagen 
--	---

Bauteilbezeichnung Decke gegen Erdreich	Bauteil Nr. 0021	
Bauteiltyp Erdanliegende Bodenplatte bis 1,5 m unter Erde	EBu	
Wärmedurchgangskoeffizient U-Wert 0,32 [W/(m²K)]		
erforderlich 0,40 [W/(m²K)]		

Konstruktionsaufbau und Berechnung

	Baustoffschichten	ID	berücksichtigen	d	λ	$R = d/\lambda$		$\rho \cdot d$
	von außen nach innen			Dicke	Leitfähigkeit	Durchlassw.	Dichte	Flächengewicht
Nr	Bezeichnung	kurz		[m]	[W/m K]	[m²K/W]	[kg/m³]	[kg/m²]
1	Feinplanum		☒	0,2000	0,700	0,286	1.800,0	360,0
2	Stahlbeton (R = 2400)		☒	0,3000	2,300	0,130	2.400,0	720,0
3	steinodur EST (80mm)		☒	0,0800	0,035	2,286	30,0	2,4
4	steinophon 300 - 3mm		☒	0,0030	0,045	0,067	25,0	0,0
5	Estrich (Beton-)		☒	0,0800	1,400	0,057	2.000,0	160,0
6	Parkett - HartholzklebeParkett (geklebt)	bauboc	☒	0,0200	0,150	0,133	740,0	14,8

Dicke des Bauteils	0,683	
Flächenbezogene Masse des Bauteils		1.257,2
Summe der Wärmedurchlasswiderstände $\sum R_t$	2,959	[m²K/W]

		R_{si}, R_{se}	
	Koeffizient	Widerstand	
Wärmeübergangskoeffizient/widerstand innen	5,882	0,170	
Wärmeübergangskoeffizient/widerstand außen			
Summe der Wärmeübergangswiderstände	$R_{si} + R_{se}$	0,170	[m²K/W]
Wärmedurchgangswiderstand	$R_T = R_{si} + \sum R_t + R_{se}$	3,129	[m²K/W]
Wärmedurchgangskoeffizient	$U = 1/R_T$	0,320	[W/(m²K)]