

Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 38 17. September 1998 S. 708-712

Raumakustische Planungs- und Messverfahren

Kurt Eggenschwiler, Kurt Heutschi

EMPA Dübendorf, Abteilung Akustik und Lärmbekämpfung.

Was können raumakustische Mess- und Prognoseverfahren heute leisten? Raumakustische Planungs- und Messverfahren die bisher aus Kostengründen nur bei grossen Projekten eingesetzt wurden, gehören heute auch bei kleineren Bauten zum Werkzeug der Akustik. Für Planung, Renovation und Problemanalysen bei Mehrzwecksaal, Theater, Konzertraum und Kirche ist die raumakustische Simulation auf dem PC heute Stand der Technik. Es ist sogar möglich, in geplante Räume hinein zu hören (Auralisation). Die Simulation wird ergänzt durch eine effiziente und aussagekräftige Messtechnik.

Konventionelle raumakustische Prognoseverfahren

Trotz der grossen Fortschritte in der Computersimulation haben die konventionellen Methoden der Raumakustik ihre Gültigkeit und Berechtigung für einfachere Räume und eine erste Annäherung bei komplexen Räumen nicht verloren. Viele der heute leider noch oft anzutreffenden Fehler in der akustischen Gestaltung könnten mit Hilfe der meist einfachen und raschen Methoden vermieden werden.

Mit der Anwendung einfacher *Faustregeln* kann bereits viel in Richtung einer guten Akustik getan werden: z.B. mit der Anordnung einer reflektierenden Fläche im Mittelfeld der Schulzimmerdecke.

Um die Nachhallzeit eines Raumes optimieren zu können, wird bei einfachen Räumen mit gutem Erfolg die altbekannte *Formel von Sabine* eingesetzt. Sie stellt einen Zusammenhang der Nachhallzeit zum Raumvolumen und zur totalen Absorption, also der Summe der Raumbegrenzungsflächen gewichtet mit dem jeweiligen Absorptionsgrad her. Das Ergebnis hat einen direkten Bezug zur Sprachverständlichkeit und Musikhörbarkeit. Die Formel basiert auf der Annahme eines gleichförmigen Schallfeldes im ganzen Raum. Die Annahme stimmt aber nur bei Räumen mit wenig Absorption, die relativ gleichmässig verteilt ist. Je weniger diese Voraussetzung zutrifft, um so ungenauer sind die Prognosen der Formel. Ein weiterer Nachteil liegt darin, dass nur eine pauschale Angabe für den Raum als Ganzes gemacht wird. Über die bekanntlich unterschiedlichen Verhältnisse von Platz zu Platz können nur ansatzweise Aussagen gemacht werden.

Die Nachhallzeitformel von Sabine:

$$T = \frac{0.16 \cdot V}{A}$$

T = Nachhallzeit [s]

V = Raumvolumen [m³]

A = äquivalente Absorptionsfläche [m²]

$$= \alpha_1 s_1 + \alpha_2 s_2 + \alpha_3 s_3 + \dots$$

α_i = Absorptionsgrad der i-ten Fläche

s_i = Flächeninhalt der i-ten Fläche [m²]

Mit den Werkzeugen der *geometrischen Akustik* sind solche Informationen besser zu gewinnen. Bei der Schallausbreitung wird wie in der geometrischen Optik mit Strahlen operiert. Mit einfachen Konstruktionen kann im Grundriss und im Schnitt der Gang der Schallstrahlen verfolgt werden (Abb. 1). Der Ansatz vernachlässigt den Wellencharakter des Schalls, unterschlägt also die Tatsache, dass je nach Wellenlänge Schallwellen z. B. an kleinen Reflektoren nicht gespiegelt sondern gestreut und ferner um Kanten gebeugt werden.

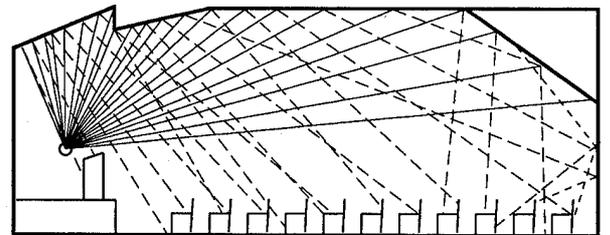


Abb. 1 Anwendung der geometrischen Akustik in einem kleinen Vortragssaal¹.

Die *wellentheoretische Raumakustik* kennt diese Begrenzung nicht. Bei diesem Ansatz wird direkt von der Wellengleichung ausgegangen, aus welcher im Prinzip alle Eigenmoden des Schallfeldes berechnet werden können. Die analytische Lösung der Wellengleichung ist nur für einfache Räume möglich. Die Methode ist nützlich zur Abschätzung der wichtigsten Eigenmoden im Tieftonenbereich kleiner Räume (wie z. B. Tonstudios und Musikprobenräume).

¹ Aus: W. Fasold, E. Veres, Schallschutz und Raumakustik, Berlin 1998

Mit den aufgezählten Verfahren waren die Möglichkeiten für das kleine Budget, resp. das einfach ausgerüstete Akustik-Büro bisher ausgeschöpft. Raffiniertere und aufwendigere Methoden waren grösseren Projekten vorbehalten. Dazu gehörte die Arbeit mit *physikalischen Modellen*, z. B. Holzmodellen im Massstab 1:16. In der zugehörigen akustischen Messtechnik sind dazu die Frequenzen des normalen Hörbereiches um den Faktor 16 zu multiplizieren. Der grosse Vorteil der Modelle liegt darin, dass der Wellencharakter des Schalls im Modell voll erhalten bleibt. Die Methode ist aufwendig. So muss z. B. im transponierten Frequenzbereich der starke Einfluss der Luftfeuchtigkeit rechnerisch oder durch Klimatisierung unter Kontrolle gehalten werden. Schliesslich muss der Absorptionsgrad der Materialien im transformierten Frequenzbereich bekannt sein. Die Methode wird aber wegen ihrer physikalischen Treue auch heute noch verwendet, wie gerade auch zwei aktuelle Projekte in der Schweiz zeigen, nämlich der neue Konzertsaal in Luzern und der neue Innenausbau im Goetheanum in Dornach.

Raumakustische Messtechnik

Die moderne Signalverarbeitung hat zu entscheidenden Verbesserungen in der raumakustischen Messtechnik geführt.

Die *Messung der Nachhallzeit* ist heute rasch und relativ einfach, wenn qualitativ hochstehende Messgeräte verwendet werden. Der Raum wird mit einem lauten Rauschen angeregt. Nach dem Abschalten der Rauschquelle wird an der Empfangsposition gleichzeitig in allen Oktav- oder Terzbändern der Pegelabfall gemessen. Mit einer Wiederholung an verschiedenen Plätzen wird ein Mittelwert gewonnen. Raschere und zuverlässigere Messungen können mit der später erwähnten MLS-Methode durchgeführt werden. Die Messung der Nachhallzeit erfolgt nach einer internationalen Norm².

Die Nachhallzeit ist allerdings heute nicht mehr das einzige Mass, mit welchem die akustischen Qualitäten eines Raumes physikalisch beschrieben werden. Wenn nicht nur eine Aussage über den gesamten Raum, sondern über einzelne Plätze, resp. Publikumsbereiche gefragt ist, dann muss die *Raumimpulsantwort* ermittelt werden: Sie kann an der Hörerposition gemessen werden, wenn an der Quelle ein Impuls abgestrahlt wird, z.B. mit einer Pistole oder über einen Lautsprecher. Die Raumimpulsantwort setzt sich zusammen aus dem Direktschall, den unmittelbar nachfolgenden Anteilen von frühen Reflexionen die aus verschiedenen Raumrichtungen einfallen und einem mehr oder weniger langen Nachhallschwanz. Bereits eine visuelle Inspektion kann Hinweise auf Unregelmässigkeiten wie Echos und Flatterechos geben (Abb. 2).

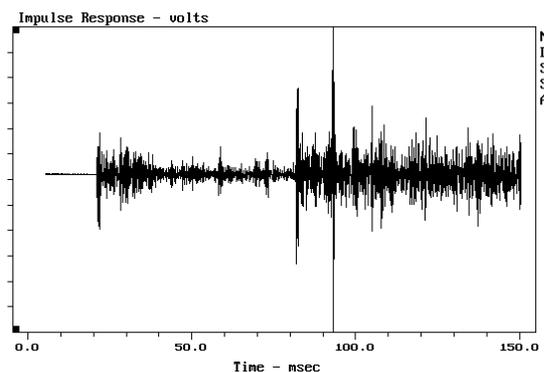


Abb. 2 Raumimpulsantwort mit extremen Echoerscheinungen.

In verschiedenen Forschungsarbeiten wurde der Zusammenhang der Komponenten der Raumimpulsantwort und unserer akustischen Wahrnehmung untersucht. Es resultierten wichtige Erkenntnisse für die Raumakustik und eine Fülle *raumakustischer Masse*, die übrigens laufend ergänzt wird. Einige der Masse haben sich heute durchgesetzt und in der Normung Eingang gefunden³, wie die Early Decay Time EDT, die Deutlichkeit D, die Klarheit C und der Seitenschallgrad LF als Mass für die Wahrnehmung der Räumlichkeit.

Mit der modernen *MLS-Korrelations-Methode* (Maximum Length Sequence) steht heute ein Messverfahren bereit, dass in bezug auf Störgeräusche relativ unempfindlich ist und damit die Messung der Raumimpulsantwort und der daraus abgeleiteten raumakustischen Masse mit einem Dodekaeder-Lautsprecher und mit einem speziellen Rauschen als Quelle recht einfach macht.

Raumakustik-Simulation auf dem Computer - Grundlagen

Es ist mit den heutigen Rechenleistungen möglich, die Wellengleichung mit den bekannten *Finite- und Rand-Elemente Methoden* numerisch zu lösen. Allerdings gelingt es nur in kleinen Räumen und bei tiefen Frequenzen, wie z. B. im Automobilbau. Für grössere Räume explodiert die Rechenzeit, wenn für den ganzen Hörbereich das Schallfeld berechnet werden soll.

Allerdings ist es auch gar nicht notwendig, das Schallfeld über den ganzen Frequenzbereich exakt zu kennen. Die Hörwahrnehmung benötigt die Informationen nicht bis ins letzte Detail. Für die Simulation auf dem Rechner ist der Rückgriff auf den Ansatz der geometrischen Akustik deshalb durchaus eine berechtigte Möglichkeit, besonders für grössere Räume.

² ISO 3382: 1997. Acoustics -- Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters

³ siehe Fussnote 2

Bei der *Spiegelschallquellen-Methode*, werden in einem ersten Schritt alle möglichen Spiegelschallquellen bis zu einer gewünschten Ordnung durch Spiegelung an den Wandebenen „konstruiert“. Dann werden die für eine Hörerposition effektiv hörbaren Spiegelschallquellen gesucht - ein äusserst aufwendiger Vorgang (Abb. 3). Schliesslich werden die Schallstrahlen von der Spiegelquelle zum Empfänger berechnet und die Energieverluste bei der Ausbreitung (geometrische Verdünnung, Absorption an den Raumflächen und durch die Luft) bestimmt. Der erste Teil der Raumimpulsantwort kann rasch und exakt ermittelt werden. Für die späteren Teile dauert die Rechnung länger.

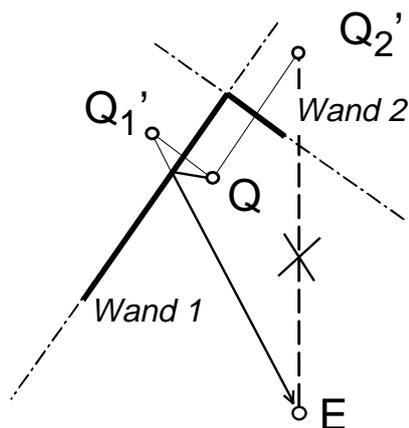


Abb. 3 Q_1' und Q_2' sind Spiegelquellen von Q . Für den Empfangspunkt E ist aber nur Q_1' hörbar

Bei der *Schallteilchen-Methode (Ray Tracing)* werden in zufällig ausgewählte Richtungen viele Schallteilchen ausgesendet, die mit einer Anfangsenergie versehen sind. Sie werden an den Wänden reflektiert und verlieren dabei je nach Materialeigenschaften einen Teil ihrer Energie. Der Empfänger wird durch eine Zählkugel repräsentiert. Von jedem Teilchen das durch die Kugel tritt wird das „Alter“ und die verbliebene Energie registriert und in die Energieimpulsantwort eingetragen. Bei dieser Methode dauert es länger, bis der erste Teil der Raumimpulsantwort bekannt ist. Es stellt sich immer die Frage, wie viele Strahlen gesendet werden müssen, um eine genügende Genauigkeit zu erreichen. Ein erster Überblick ist jedoch rasch möglich.

Die Vor- und Nachteile der beiden Verfahren werden in *kombinierten Methoden* ausgeglichen. So wird das Ray Tracing verwendet, um die sichtbaren Spiegelschallquellen zu finden. Die Rechenzeit wird dadurch drastisch vermindert.

Neuere Programme bauen die Raumimpulsantwort häufig aus verschiedenen Teilen auf, z. B. einem frühen Teil mit einer raschen Berechnung der Spiegelschallquellen und dem Nachhallschwanz aus den Ergebnissen eines Ray Tracing.

Zuverlässigkeit der Raumakustik - Simulation

Bei älteren Programmen die rein auf Spiegelschallquellen oder auf Ray Tracing mit streng geometrischer

Reflexion basierten, waren die Resultate der Simulationen z. T. recht unzuverlässig. So ergaben Versuche, die vor einigen Jahren mit zwei kommerziellen Programmen an der EMPA durchgeführt wurden, bei der Simulation der Nachhallzeit einer grossen Kirche sehr grosse Abweichungen zu den Messresultaten⁴. Die Ursache lag bei der Vernachlässigung bzw. ungenügenden Berücksichtigung der *Schallstreuung*. Die Wandstrukturen mussten als rein geometrisch reflektierende Flächen modelliert werden, obwohl sie eigentlich den Schall streuen. Schallstreuende Flächen sind z.B. Säulen, Kanten, Vorsprünge, Stukkaturen, gröbere Verzierungen aller Art und schliesslich das Publikum.

Wie wichtig es ist, die Schallstreuung in der Modellierung zu berücksichtigen, zeigte sich u.a. bei einem internationalen Rundversuch 1994/95 an der auch die EMPA teilnahm⁵. Programme, welche eine diffuse Reflexion geschickt modellieren, schnitten besser ab. Schallteilchen können z. B. statt rein geometrisch diffus gestreut werden, entsprechend einem der reflektierenden Fläche zugeordneten Diffusitätsgrad.

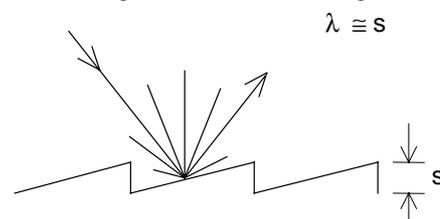


Abb. 4 Schallstreuung an einer Wandstruktur mit einer Strukturtiefe in der Grössenordnung der Wellenlänge des einfallenden Schalles

Die Bilanz des Rundversuchs, bei dem die Prognoseresultate für einen grösseren Hörsaal mit den Messresultaten verglichen wurden, war übrigens ernüchternd. Von den 16 teilnehmenden Programmen erreichten nur drei eine Bewertung, welche die Prognose als genügend zuverlässig bezeichneten. Neben der Schallstreuung zeigte sich auch die Modellierung der Schallausbreitung über Publikum als heikel.

Das Ergebnis des Rundversuchs bedeutet allerdings keineswegs, dass die Programme nicht reif für den praktischen Einsatz wären. Die Programme liefern ja Ergebnisse, die mit anderen Methoden nicht, oder nur umständlich zu erhalten sind. Wenn die Simulation und Interpretation der Resultate mit raumakustischem Sachverstand und Erfahrung erfolgen, ergibt sich auf jeden Fall ein unverzichtbarer Erkenntnisgewinn.

⁴ Eggenschwiler K., Erfahrungen mit zwei kommerziellen Raumakustik-Simulations-Programmen. DAGA 1993 in Frankfurt

⁵ Vorländer M., International round robin on room acoustical computer simulation, ICA 95

Auralisation - Hineinhören in geplante Räume

Ein alter Traum ist heute bereits zu einem guten Teil erfüllt: Es ist möglich, in geplante oder nicht mehr bestehende historische Räume hineinzuhören. Musik oder Sprache, aufgezeichnet in einem reflexionsarmen Raum, wird digitalisiert und mit der simulierten Raumimpulsantwort des Hörerplatzes über die mathematische Faltungsoperation verknüpft.

Das exakte Verfahren ist sehr rechenintensiv und benötigt viel Speicherplatz, läuft aber im Prinzip auf einem PC. Eine abgekürzte Methode, welche z.B. an der EMPA verwendet wird, benutzt einen leistungsstarken Profi-Audio-Prozessor. Von der Raumimpulsantwort werden dem Gerät der Pegel des Direktschalls, die Pegel und Verzögerungen der ersten maximal 130 Reflexionen und die Nachhallzeit übermittelt. Die Verarbeitung des Audiosignals geschieht in Echtzeit, weil der Rechenaufwand weniger gross ist. Damit eignet sich das Verfahren sehr gut um rasch zwischen Varianten umzuschalten - und nicht zuletzt auch für Demonstrationen im Unterricht.

Auralisationsbeispiele die an der EMPA berechnet wurden sind über das Internet abrufbar⁶.

Praktische Erfahrungen mit Raumakustik-Simulation - Beispiele

An der EMPA werden PC-Simulationsprogramme in der Raumakustik seit einigen Jahren mit wachsendem Erfolg angewendet. In dieser Zeit konnte mit Programmen zur Dimensionierung von Beschallungsanlagen, vor allem aber mit reinen Raumakustik-Simulationsprogrammen Erfahrung gesammelt werden.

Die Programme zur *raumakustischen Simulation von Beschallungsanlagen* basieren meist auf recht einfachen Algorithmen, mit denen eine relativ schnelle Übersichtsberechnung durchgeführt werden kann. Sie verfügen über eine ausführliche Datenbank mit Messresultaten von realen Lautsprechern. Die geometrische Modellierung der Räume darf relativ grob bleiben. Oft behilft man sich mit der Anpassung oder direkten Verwendung von Prototyp-Räumen. Resultate der Simulationen sind z.B. die Verteilung der Sprachverständlichkeit oder Lautstärkepegel im Publikumsbereich. Mit etwas Erfahrung können recht rasch verschiedene Varianten (Lautsprecherpositionen und Typen) gerechnet und verglichen werden. Für mittelgrosse und grosse Räume ist der Einsatz solcher Programme Stand der Technik, aber leider noch nicht überall etabliert. Viele der nicht oder falsch ausgelegten Anlagen welchen die EMPA-Experten im Lauf der Zeit in der ganzen Schweiz begegnet sind, hätten mit einem relativ geringen Planungsaufwand mit dem Einsatz solcher Programme vermieden werden können.

Die Programme für eine Simulation der „reinen“ *Raumakustik* haben ein komplexeres Innenleben, über das allerdings der Benutzer Bescheid wissen sollte. Der

Zeitaufwand um Geometrie und Materialdaten einzugeben, die Berechnung durchzuführen und die Resultate zu interpretieren ist grösser als bei den eben erwähnten Programmen.

An der EMPA gelangt heute vor allem das dänische Programm ODEON zum Einsatz (eines der drei besten beim oben erwähnten Rundversuch). Es arbeitet mit einem kombinierten Spiegelschallquellen - Ray Tracing Algorithmus. Als reines Ray Tracing Programm steht zudem RayPid (Autor: K. Heutschi) zur Verfügung.

Für die Eingabe der Raumgeometrie wurden praktisch nie die CAD-Daten des Architekten verwendet. Es erwies sich als schneller, die Daten von Hand aus den Plänen abzulesen und im jeweiligen Datenformat einzugeben. CAD-Modelle verfügen über viel zu viele Einzelheiten, was nicht nur zu langen Rechenzeiten bei der Simulation führen würde, sondern je nach Algorithmus auch zu falschen Ergebnissen. Für die entsprechenden Arbeiten ist etwa mit einem Arbeitstag zu rechnen. In dieser Phase werden auch die Materialdaten zugeordnet: Für den Schallabsorptionsgrad werden Tabellen und Herstellerangaben verwendet. Für den Diffusitätsgrad reicht eine relativ grobe Schätzung, wie Untersuchungen⁷ gezeigt haben.

Die Rechenzeiten liegen heute für die Simulation der Raumimpulsantwort eines einzelnen Hörerpunktes bei wenigen Minuten. Bei Übersichtsflächen, zusammengesetzt aus vielen Einzelberechnungen vervielfacht sich die Zeit naturgemäss.

Schliesslich sind gerade die rechenintensivsten Resultate die anschaulichsten (Abb. 5). Hier wird auch dem Laien rasch klar, wo die Sprachverständlichkeit noch ungenügend ist, oder in welchen Bereichen die empfundene Räumlichkeit vermutlich schlecht ist.

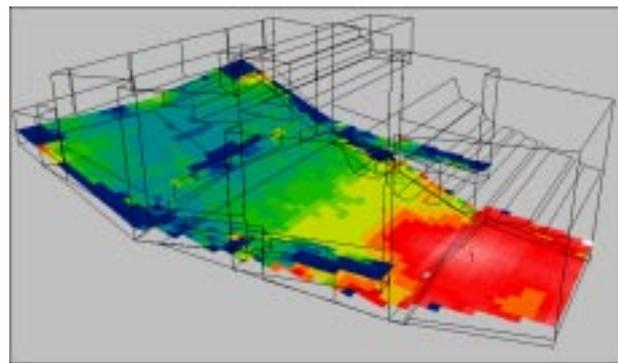


Abb. 5 Darstellung der Deutlichkeit D50 in einem Mehrzwecksaal

⁷ Heutschi K., Monte-Carlo Analysis in Rectangular Rooms Concerning the Sensitivity of Ray Tracing Simulations Relative to the Degree of Diffusion. Acta Acustica, vol. 2, no. 6, 1994 p.505-510

⁶ <http://www.arch.ethz.ch/eggenschwiler/vor-publ.html>

Im Verlauf der raumakustischen Projektierung wird die Raumimpulsantwort visuell beurteilt und analysiert, welche Raumflächen für einzelne Anteile verantwortlich sind.

Mit der Auralisation werden die Raumimpulsantworten schliesslich hörend beurteilt. Manchmal findet sich auf diese Art ein schlechter Platz, der vorher übersehen wurde.

In verschiedenen Räumen wurde die Raumakustiksimulation an der EMPA mit Gewinn eingesetzt. Eine Auswahl sei im folgenden aufgezählt: Stadthausaal Illnau-Effretikon, Konzertsaal Kartause Ittingen, Grosser Saal Casino Schwyz, Konzertsaal im Stadthaus Winterthur. Am Projekt des Pfarreiheims Bronschhofen zeigt sich exemplarisch die Anwendung dort, wo andere Methoden unzuverlässig sind, also bei heikler Geometrie und Verteilung der Absorption.

In der Projektierungsphase des Pfarreiheims Bronschhofen wurden Computersimulationen durchgeführt um die Auswirkungen der ungewöhnlichen Form des ovalen Kapellenraums zu untersuchen. Dabei standen zwei Aspekte im Vordergrund: Fokussierung und damit sehr inhomogene Schallfeldverteilungen als Folge der Ellipsenform; Ausbildung eines Nachhallreservoirs durch die grosse Höhe. Auf Grund der Simulationen konnten geeignete Massnahmen geprüft und optimiert werden. Abb. 6 zeigt eine Isometrie und Ansichten der Situation (die Punkte entsprechen den Empfangsorten). In Abb. 7 ist das Ergebnis einer Computersimulation in Form der Raumimpulsantwort für einen Empfangspunkt dargestellt.

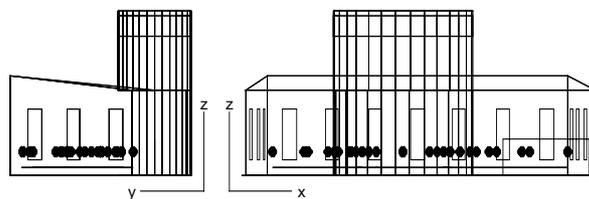
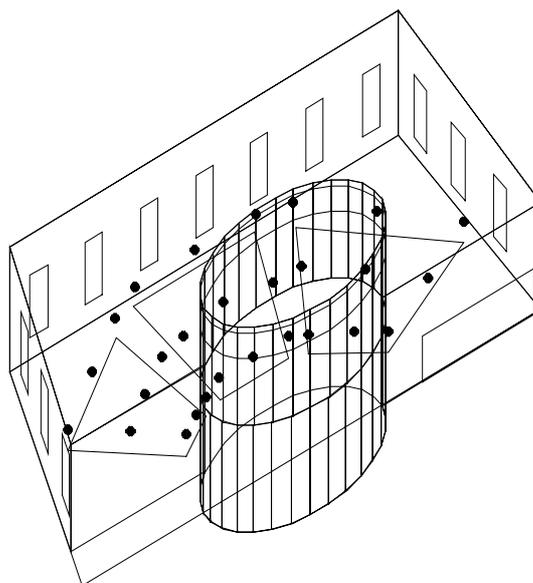


Abb. 6 Isometrie und Schnitte Pfarreiheim Bronschhofen. (Akustische Beratung: E. Baumann, Bazenheid und K. Heutschi, EMPA Dübendorf)

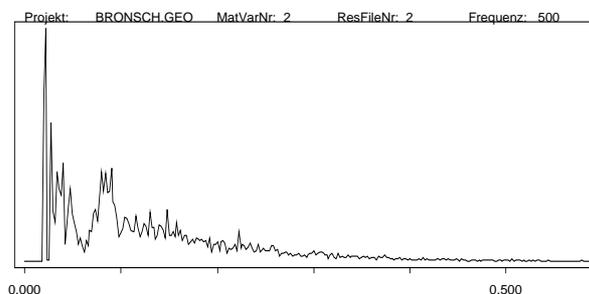


Abb. 7 Berechnete (quadierte) Raumimpulsantwort Bronschhofen an einem der Empfangspunkte.