

Möglichkeiten der Raumakustik bei der Projektierung von Musikräumen

Kurt Eggenschwiler

Abteilung Akustik/Lärmbekämpfung, EMPA, CH-8600 Dübendorf

1 Einleitung

1.1 Gesamtheit der Sinne

In der Gegenwart besteht ein Primat des Sehens vor dem Hören. Selbst bei Musikräumen wird der Akustik oft nicht die notwendige Bedeutung zugemessen. Anderen Sinnesbereiche geht es ähnlich, obwohl doch eigentlich die Gesamtheit der Sinne an der Wahrnehmung beteiligt ist. Nach Steiner¹ und Schneider² sind zwölf Sinnesbereiche zu unterscheiden und zu pflegen, nämlich eine erste Gruppe mit Tastsinn, Lebenssinn, Bewegungssinn und Gleichgewichtssinn, eine zweite mit Geruchssinn, Geschmackssinn, Sehsinn und Wärmesinn, und eine dritte mit Proportionen- oder Tonsinn, Gestalt-sinn oder Lautsinn, Gedankensinn und Identitätssinn oder Ichsinn.

Ein Musikraum ist dann gelungen, wenn die Architektur für *alle* Sinnesbereiche adäquate Wahrnehmungen ermöglicht, die sich harmonisch gegenseitig stützen und ergänzen – eine Forderung, die häufig nicht erfüllt wird. Es genügt nicht, die im folgenden dargestellten technischen Werkzeuge zu beherrschen, auch wenn sie für die Akustik so wichtig sind wie entsprechende Berechnungsverfahren für die Statik eines Gebäudes.

1.2 Grundphänomene der Raumakustik

Hope Bagnal³, ein früher englischer Raumakustiker, teilte die Auditorien in zwei Gruppen, solche mit Freiluftakustik und solche mit der Akustik einer Höhle. Aus der ersten Gruppe entstand der Konzertsaal, aus der zweiten entwickelte sich das Theater.

Die beiden Pole, der reflexionsfreie Raum und der Hallraum, können als Grundphänomene der Raumakustik⁴ gehört werden. Der erste Pol ist vor allem verbunden mit dem Direktschall und dem Raumvolumen, der zweite mit dem Nachhall und dem Material im Raum.

Und die Akustik der Räume zwischen den Polen? Ist sie nur eine Mischung von Direktschall und Nachhall? Ein aufmerksames Hinhören erkennt frühe Schallreflexionen als Würze, quasi als Steigerung der beiden Pole. Sie werden erzeugt durch den Einfluss der Raumform. Die akustische Raumwahrnehmung liegt damit im Dreieck von Direktschall, Nachhall und Reflexionen.

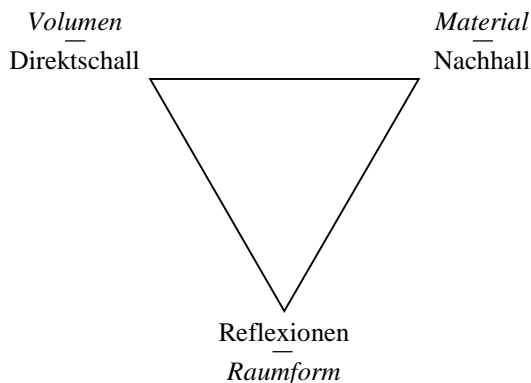


Abb. 1 Dreieck von Direktschall, Nachhall und Reflexionen.

2 Wellentheoretische Akustik⁵

2.1 Lösung der Wellengleichung

Die Physik kümmert sich weniger um Wahrnehmungen als um Schalldruckschwankungen in Form überlagerter Eigenschwingungen des Raumes, also der Lösungen der Wellengleichung. Analytisch sind allerdings nur einfachste Raumformen zu bewältigen. Für den Rechteckraum sind die Frequenzen der Eigenmoden und die Schalldruckverteilung gut zu berechnen. Eine numerische Berechnung komplizierter Räume ist heute mit den sogenannten Finite und Rand Elemente Methoden theoretisch möglich, wegen des enormen Rechenbedarfs aber nur für tiefe Frequenzen und kleine Räume praktisch durchführbar. Aus psychoakustischen und auch physikalischen Gründen ist es aber auch gar nicht notwendig, das Schallfeld über den ganzen Frequenzbereich exakt zu kennen.

2.2 Anwendung für Musikproberäume und Tonstudios

Bei kleineren Räumen spielen Eigenmoden bei tiefen Frequenzen eine grosse Rolle, weil die Eigenmodendichte in diesem Frequenzbereich noch nicht so gross ist. In Abb. 2 sind die starken örtlichen Schwankungen des Schalldrucks für eine Eigenschwingung tiefer Frequenz dargestellt⁶.

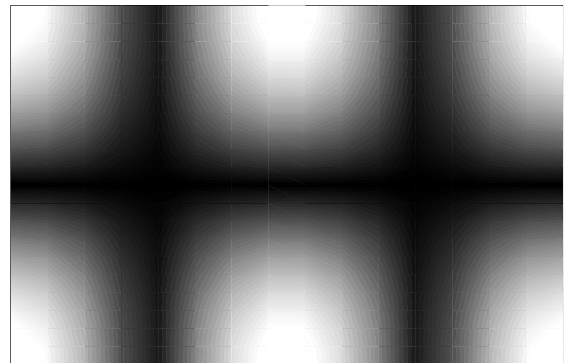


Abb. 2 Verteilung der Schalldruckamplituden in einem Raum von 3.4 m x 5.4 m bei einer Anregung mit einem Reinton der Frequenz 163 Hz; (weiss: Amplitude A = maximal, schwarz A = 0, Grautöne: A = 0 ... 1).

Weiter ist der Frequenzgang der Übertragungsfunktion von Quelle zu Empfänger in einem kleinen Raum sehr unregelmässig. In Abb. 3 sind die Schwankungen schematisch dargestellt. In Tonstudios, wo ein linearer Frequenzgang gefordert wird, muss durch Bedämpfen des Raumes im Tieftonbereich mit Plattenschwingern, Helmholtzresonatoren oder den neu entwickelten, sehr wirksamen Verbundplattenresonatoren⁷ Abhilfe geschaffen werden. Der Frequenzgang im Tieftonbereich wird, wie in Abb. 3 unten dargestellt, ausgeglichener. Das gleiche gilt für Musikproberäume. Dort bewirken die Resonanzen je nach Ton und Position im Raum entweder eine schlechte oder eine übermässig starke Unterstützung der tiefen Töne. Selbstverständlich sind in solchen Räumen auch im Mittel- und Hochtonbereich

akustische Vorkehrungen zu treffen, wie durch variable Absorption in Musikproberäumen (z. B. Vorhänge).

Mit einem Lautsprecher mit effizienter Abstrahlung der tiefen Töne in einer Raumecke können mit einem Sinusgenerator die Raummoden in einem kleinen Raum übrigens eindrucksvoll demonstriert werden.

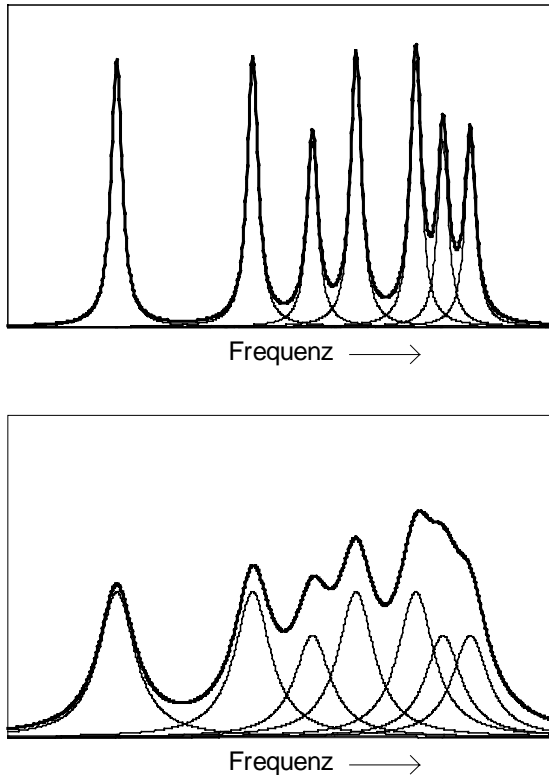


Abb. 3 Schematischer Frequenzgang der Übertragung von der Quelle zum Empfänger in einem kleinen Raum.

Oben: Raum mit schallharten Flächen → schwach gedämpfte Moden

Unten: Gleicher Raum, im Tieftonbereich schallabsorbierend.

2.3 Raumproportionen

Wohlklingende musikalische Intervalle ertönen, wenn die Tonfrequenzen in einfachen ganzzahligen Verhältnissen zueinander stehen. In der Architektur wurden deshalb hin und wieder Proportionen entsprechend musikalischen Intervallen gefordert⁸. Naheliegender scheint dies besonders für Musikräume. In grossen Räumen ist die Eigenmodendichte aber bereits bei tiefen Hörfrequenzen recht hoch. Wellentheoretische und psychoakustische Betrachtungen sprechen damit bei Konzertsälen gegen eine besondere akustische Wirkung der Proportionen⁹. Wenn etwas daran liegt, dann muss der Grund eher bei der im ersten Abschnitt diskutierten gesamtheitlichen Sinneswahrnehmung gesucht werden².

Bei Tonstudios und Musikproberäumen wird man ganzzahlige Proportionen vermeiden, weil sonst viele Moden die gleiche Frequenz aufweisen und der Frequenzgang sehr unregelmässig wird.

2.4 Bedeutung der Wellentheorie für grössere Räume

Auch wenn exakte Lösungen für den ganzen Hörbereich in grösseren Räumen nicht möglich und auch nicht erforderlich sind, darf bei allen im folgenden diskutierten Vereinfachungen der Wellencharakter des Schalles nicht ganz vernachlässigt werden. So ist es bei einer geometrisch betrachteten Reflexionen natürlich wesentlich, wie gross ein Reflektor ist (siehe 3.3).

3 Vereinfachte raumakustische Ansätze und deren Anwendung⁵

3.1 Der Direktschall

Nur in seltenen Fällen (auf Emporen oder hinter Säulen) haben Plätze in Konzerträumen keinen Direktschall. Er ermöglicht eine richtige Ortung der Schallquelle und trägt zur Lautstärke bei. Bei bekannter Schallleistung und Richtcharakteristik der Quelle ist die Intensität des Direktschalls einfach zu berechnen.

3.2 Statistische Raumakustik - Die Nachhallzeit

Die statische Raumakustik basiert auf der Annahme eines Schallfeldes (Diffusfeld) mit gleicher Energiedichte im ganzen Raum und einer gleichgewichtigen Schallausbreitung in alle Richtungen. Mit diesen Angaben gelangt man zur alten Formel von Sabine.

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

T = Nachhallzeit [s]

V = Raumvolumen [m³]

A = äquivalente Absorptionsfläche [m²]
= $\sum \alpha_i s_i$

α_i = Absorptionsgrad der i-ten Fläche

s_i = Flächeninhalt der i-ten Fläche [m²]

Die einfache Formel zeigt den Zusammenhang von Nachhallzeit, Raumvolumen und totaler Absorption (der Summe der Raumbegrenzungsflächen gewichtet mit dem jeweiligen Absorptionsgrad).

Die Nachhallzeit ist natürlich nur ein sehr pauschaler Parameter für den ganzen Raum. Das Ergebnis hat aber einen direkten Bezug zur Sprachverständlichkeit und zur Musikhörsamkeit. Für die Nachhallzeit gibt es Vorschläge für optimale Werte, welche sich für eine erste Annäherung gut eignen. Es lässt sich auch rasch überprüfen, ob ein kleiner oder mittelgrosser Vortragssaal zum Dröhnen neigt, weil die Nachhallzeit im Tieftonbereich viel zu lang ist, oder ob ein Konzertsaal eine klangliche Wärme hat, weil umgekehrt der Nachhall in diesem Bereich etwas länger ist als bei mittleren Frequenzen.

3.3 Geometrische Raumakustik

Eine optimale Nachhallzeit in einem Raum garantiert noch keine gute Hörsamkeit. Schliesslich sind die akustischen Verhältnisse ja nie auf allen Plätzen gleich, wie es die statistische Raumakustik eigentlich voraussetzt.

Die in 1.2 erwähnten Raumreflexionen, welche zeitlich früh nach dem Direktschall beim Empfänger eintreffen, bestimmen die Klarheit und die räumliche Wahrnehmung der Musik. Die Entdeckung der Bedeutung der

frühen seitlichen Reflexionen für die Empfindung der Räumlichkeit hat der Architektur einen wichtigen Hinweis für die Gestaltung von Konzertsälen geliefert. Es erklärte sich damit auch, wieso Schuhschachtel-Konzertsäle akustisch besonders gut klingen: Der Quaderraum ermöglicht viele solcher Reflexionen. Aber auch in anderen Raumformen kann für eine genügende Räumlichkeit durch geschickte Anordnung der Raumflächen und Reflektoren die Randbedingungen für das Erlebnis der Räumlichkeit geschaffen werden.

Für Untersuchungen, z. B. im Zusammenhang mit den frühen Reflexionen, wird die geometrische Raumakustik beigezogen, heute meistens in Form von Computerprogrammen. Obwohl in der Akustik die Wellenlängen recht gross sind, kann wie in der Optik recht erfolgreich mit Schallstrahlen gearbeitet werden (Konstruktion der Spiegelschallquelle: Abb. 4). Noch einmal sei erwähnt, dass der Wellencharakter des Schalles immer mit berücksichtigt werden sollte: Kleine Reflektoren sind für tiefe Frequenzen, also grosse Wellenlängen, unwirksam.

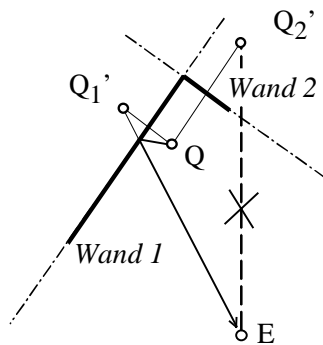


Abb. 4 Konstruktion von Schallstrahlen. Q_1' und Q_2' sind Spiegelquellen von Q . Beim Empfangspunkt E ist aber nur Q_1' hörbar.

Im Schnitt und im Grundriss sind zeichnerisch rasch wichtige Erkenntnisse zu gewinnen, wie z. B., dass es in einem Schulzimmer günstig ist, das Mittelfeld der Decke schallhart zu gestalten. Damit werden Schallreflexionen ermöglicht, welche die Sprachverständlichkeit erhöhen. Für eine gute Sprachverständlichkeit sollte zudem die Nachhallzeit recht kurz sein. Die dafür notwendige Absorption muss also am Rand der Decke und z. B. an der Rückwand angebracht werden. In Musikzimmern, wo für mehrere Schüler(-innen) unterrichtet wird, kann das gleiche Prinzip verwendet werden.

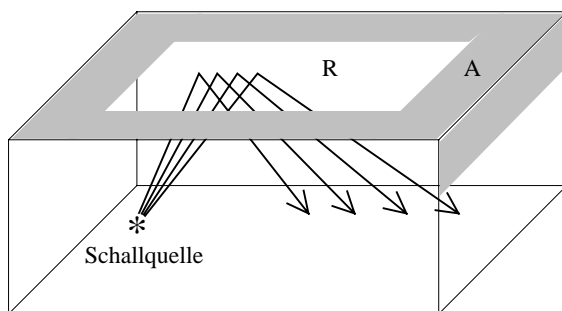


Abb. 5 Einige Schallstrahlen und Anordnung reflektierender (R) und absorbierender (A) Flächen in einem Schulzimmer.

In grösseren Räumen kann mit Hilfe der geometrischen Raumakustik die Raumform optimiert werden, und Flächen gefunden werden, die schädliche Echos zurückwerfen oder fokussierend wirken. Wegen der Einfachheit der geometrischen Akustik liegt es auf der Hand, das Verfahren auf dem Computer zu programmieren. Die geometrische Akustik ist die Grundlage der gegenwärtigen raumakustischen Computersimulation.

4 Raumakustische Prognose⁵

4.1 Die Raumimpulsantwort

Technisches Ziel der raumakustischen Prognose ist die Raumimpulsantwort. Sie ist der zeitliche Schalldruckverlauf, der bei einem Empfangspunkt im Raum gemessen werden kann, wenn er mit einem Impuls an der Quellenposition angeregt wird. Die Raumimpulsantwort enthält sämtliche Informationen über die Übertragungsstrecke von Quelle zu Empfänger (das System ist linear und zeitinvariant). Bleibt die Aufgabe einer aussagekräftigen Analyse. Bereits eine visuelle Inspektion kann Hinweise auf Unregelmässigkeiten wie Echos und Flatterechos geben (Abb. 6). Weiter werden bestimmte raumakustische Masse beigezogen.

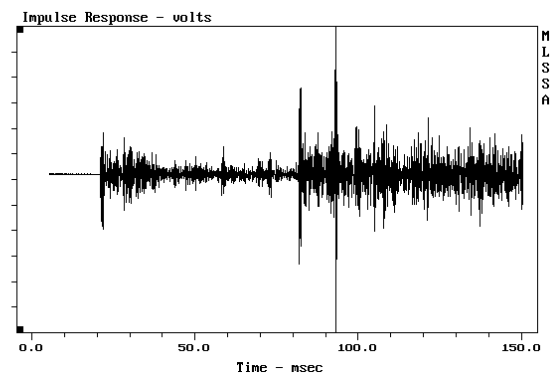


Abb. 6 Beispiel einer Raumimpulsantwort mit extremen Echoerscheinungen.

4.2 Raumakustische Masse

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 Normung¹⁰ Eingang gefunden. Dazu gehören die Early Decay Time EDT für die empfundene Nachhalldauer, das Deutlichkeitsmass C50 und der Sprachübertragungsindex STI für die Sprachverständlichkeit, das Klarheitsmass C80 für die wahrgenommene Klarheit der Musik und der Seitenschallgrad LF als Mass für die Wahrnehmung der Räumlichkeit.

4.3 Modellmessungen

Obwohl im Computerzeitalter bei der Prognose sofort an die Computersimulation gedacht wird, werden auch heute in der Raumakustik noch physikalische Modelle verwendet, z. B. Holzmodelle im Massstab 1 : 16. In der zugehörigen akustischen Messtechnik sind dazu die

Frequenzen des normalen Hörbereichs mit dem Faktor 16 zu multiplizieren. Der Vorteil der Modelle liegt darin, dass der Wellencharakter des Schalls im Modell erhalten bleibt. Die Methode ist aber aufwendig. Als Schallquellen werden meistens Knallfunkenstrecken benutzt. Es muss berücksichtigt werden, dass die Dämpfung der Luft im transponierten Frequenzbereich sehr viel grösser ist als normal. Beim Empfänger muss dies für den eintreffenden Schall in Funktion der Weglänge, die er im Modell zurückgelegt hat, rechnerisch berücksichtigt werden.

4.4 Simulation der Raumakustik mit dem Computer

Wie erwähnt stützt sich die rechnerische Simulation der Raumakustik auf die geometrische Akustik. Der Raum wird über ein Fadenmodell definiert, welches relativ grob bleiben darf (Abb. 7). Für jede Raumbegrenzungsfläche wird der Absorptionsgrad frequenzabhängig eingegeben.

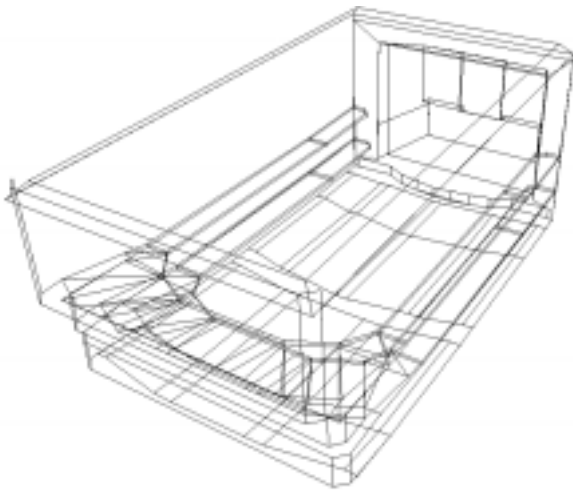


Abb. 7 Fadenmodell eines Raumes für die raumakustische Computersimulation (Boston Symphony Hall)

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, weil es sehr viele unhörbare Spiegelschallquellen gibt (Prinzip: siehe Abb. 4). 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.

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, einem frühen Teil mit einer raschen Berechnung der Spiegelschallquellen und dem Nachhallschwanz, welcher aus den Ergebnissen eines Ray Tracing gewonnen wird (siehe Abb. 8).

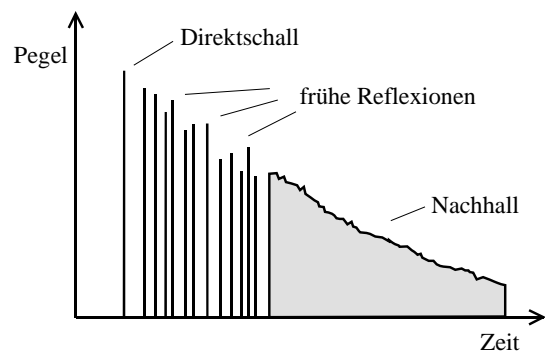


Abb. 8 Energieimpulsantwort (Pegel-Zeit-Verlauf) mit Direktschall, frühen Reflexionen und Nachhallschwanz.

Bisher wurde davon ausgegangen, dass der Schall streng geometrisch reflektiert wird. In realen Räumen ist dies aber meistens nicht der Fall. Viele Wandstrukturen z. B. Säulen, Kanten, Vorsprünge, Stukkaturen, gröbere Verzierungen aller Art und schliesslich auch das Publikum streuen den Schall (Abb. 9). Programme, welche die Schallstreuung nicht modellieren, zeigen denn auch schlechte Resultate. In den oben erwähnten kombinierten Modellen werden deshalb beim Ray Tracing die Schallstrahlen an den Reflexionsflächen je nach Diffusitätsgrad gestreut. Er muss daher für jede Raumfläche der Diffusitätsgrad (ein Mass dafür, wie stark der Schall gestreut wird) frequenzabhängig eingegeben werden. Es genügen dabei relativ grobe Schätzungen.

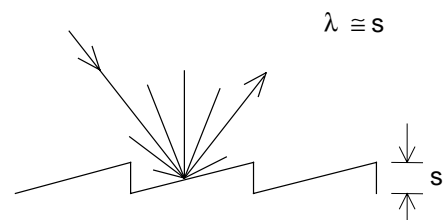


Abb. 9 Schallstreuung an einer Wandstruktur mit einer Strukturtiefe in der Grössenordnung der Wellenlänge des einfallenden Schalls.

Die raumakustischen Programme laufen heute problemlos auf dem PC. Zur Berechnung der Raumimpulsantwort an einem einzigen Empfangspunkt ist etwa eine Minuten Rechenzeit notwendig. Für Berechnungen auf einer ganzen Hörerfläche muss entsprechend mehr Zeit eingesetzt werden (Beispiel siehe Abb. 10). In zwei internationalen Rundversuchen wurden die Pro-

gnosen mit Messungen verglichen. Das Resultat war noch nicht besonders erfreulich. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Programme nicht reif für den praktischen Einsatz wären. Sie 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.

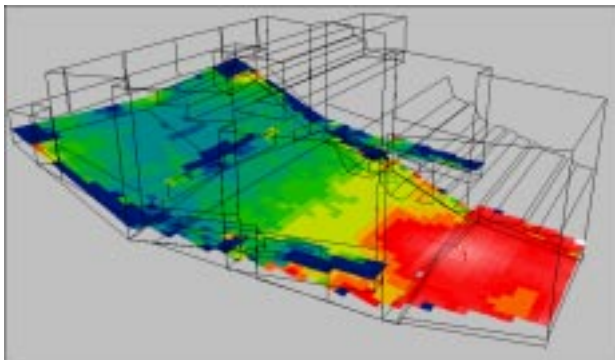


Abb. 10 Darstellung eines raumakustischen Masse in einem grossen Mehrzwecksaal.

4.5 Auralisation – Hineinhören in 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 rechenintensiv und benötigt viel Speicherplatz, läuft aber heute 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.

Beispiele von Auralisationen die an der EMPA berechnet wurden, sind über das Internet abrufbar¹¹.

5 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 MLS-Methode durch-

geführt werden. Die Messung der Nachhallzeit erfolgt nach einer internationalen Norm¹⁰.

Die Raumimpulsantwort kann an der Hörerposition gemessen werden, wenn an der Quelle ein Impuls abgestrahlt wird, z. B. mit einer Pistole oder über einen Lautsprecher. Mit der modernen *MLS-Korrelations-Methode* (Maximum Length Sequence) steht heute aber 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 Lautsprecher mit kugelförmiger Abstrahlcharakteristik recht einfach macht. Mit neueren Messmethoden ist es auch möglich, Reflexionen aus verschiedenen Schalleinfallrichtungen zu detektieren.

6 Zusammenfassung

Die technisch-wissenschaftlichen Methoden der Raumakustik haben sich in den letzten zwei Jahrzehnten stark verbessert und sind wesentlich erweitert worden. Für die Analyse von Mängeln in bestehenden Räumen und zur Qualitätskontrolle steht eine vielfältige Messtechnik zur Verfügung. Für die Sanierung und die Planung neuerer Räume können verschiedene Prognosemethoden benutzt werden. Aus den Ergebnissen der Psychoakustik wurden schliesslich raumakustische Masse abgeleitet welche für die Praxis recht hilfreich sind.

Als Ziel für die Zukunft bleibt der Wunsch, dass bei der Planung von Räumen die Akustik rechtzeitig mit berücksichtigt wird. Die Architekten sollen im Idealfall den zu planenden Raum voraushören und die Akustik im Sinne der einleitenden Bemerkungen einbetten in die anderen Bereiche der Sinneswahrnehmungen.

- ¹ Steiner Rudolf, Themen aus dem Gesamtwerk "Zur Sinneslehre", Verlag Freies Geistesleben, Stuttgart.
- ² Schneider, Wulf. Sinn und Un-Sinn. Umwelt sinnlich erlebbar gestalten in Architektur und Design. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 1995.
- ³ Gemäss Forsyth M., Dickreiter R. & M., Bauwerke für Musik. Konzertsäle und Opernhäuser, Musik und Zuhörer vom 17. Jahrhundert bis zur Gegenwart. Saur, München 1991.
- ⁴ Hörbeispiele reflexionsfrei und im Hallraum aufgezeichneter Musik: siehe <http://www.arch.ethz.ch/eggenschwiler/>
- ⁵ Übersicht gebräuchlicher raumakustischer Methoden: z. B. Fasold W., Veres E., Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Verlag für Bauwesen. 1998. Siehe auch Literaturverzeichnis auf <http://www.arch.ethz.ch/eggenschwiler/>
- ⁶ Animation in CD-ROM: Ausschnitte aktueller Themen 1998 des Fraunhofer Instituts für Bauphysik, Stuttgart.
- ⁷ Fuchs H.V., Zha X., Wirkungsweise und Auslegungshinweise für Verbund-Platten-Resonatoren. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 43 (1996)
- ⁸ Naredi-Rainer, Paul von. Architektur und Harmonie. DuMont Buchverlag Köln, 1982
- ⁹ Cremer/Müller. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band II. Seite 231
- ¹⁰ ISO 3382: 1997. Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters
- ¹¹ Hörbeispiele siehe <http://www.arch.ethz.ch/eggenschwiler/>