

Raumakustik und Multimedia

Kurt Eggenschwiler

Abteilung Akustik/Lärmbekämpfung, EMPA, CH-8600 Dübendorf

1 Einleitung

Raumakustik und Multimedia haben mehr Berührungspunkte als dies auf den ersten Blick scheint. Beim zweiten Hinhören wird klar, dass Audiosignale fast immer auch ein Raumerlebnis vermitteln. Das Erzeugen eines adäquaten Raumklangs ist eine wichtige Aufgabe bei der Produktion von Multimediaprodukten. Neben allen Kenntnissen der Audiosignalverarbeitung und Psychoakustik müssen dazu die Grundlagen der Raumakustik berücksichtigt werden.

Bedeutend ist aber auch, dass die Produktion der Audiosignale für Multimedia in den meisten Fällen in Räumen geschieht. Schallsignale werden in Aufnahmeräumen aufgezeichnet und in Abhörräumen bearbeitet. Der Einfluss des Raumes ist dabei sehr stark und muss mit berücksichtigt werden.

Es lohnt sich deshalb, einen kurzen Blick auf die Methoden der Raumakustik zu werfen, die Verhältnisse in kleinen Räumen zu untersuchen und Schlüsse für Anwendungen im Multimediabereich zu ziehen.

2 Der Nachhall – Statistische Raumakustik

Die Akustik von Räumen wird rasch mit dem Nachhall in Verbindung gebracht. Der Nachhall ist ein wichtiges Phänomen, aber wie später ausgeführt, nicht das einzige welches es zu beachten gilt.

Die Nachhallzeit entspricht der Zeitdauer die nach dem Abschalten einer Schallquelle verstreicht, bis der Schalldruck auf einen Tausendstel seines Anfangswerts gesunken ist.

Die Nachhallzeit ist ein sehr pauschaler Parameter, der für den ganzen Raum gelten soll. Sie hat einen direkten Bezug zur Sprachverständlichkeit und zur Musikhörbarkeit. Für die Nachhallzeit gibt es Vorschläge für optimale Werte, welche sich für eine erste Annäherung gut eignen. Für grosse Räume sind für Musik etwa 2 Sekunden, für Sprache etwa 1 Sekunde optimal. Für kleinere Räume sind die Werte tiefer.

Die Nachhallzeit lässt sich mit einer Faustformel rasch berechnen. Die einfache Formel von Sabine zeigt den Zusammenhang von Nachhallzeit T , Raumvolumen V und totaler Absorption A (der Summe der Raumbegrenzungsflächen S gewichtet mit dem jeweiligen Absorptionsgrad α_s):

$$T = \frac{0.16 \cdot V}{A} \quad A = \sum \alpha_{si} \cdot S_i$$

Die Formel eignet sich gut zur Dimensionierung einfacher Räume zum Erreichen der optimalen Werte. Mit diesen Berechnungen kann auch rasch überprüft werden, ob ein Raum z. B. zum Dröhnen neigt, weil die Nachhallzeit im Tieftonbereich viel zu lang ist

Die Berechnung basiert auf der Annahme eines Schallfeldes mit gleicher Energiedichte im ganzen Raum und einer gleich gewichteten Schallausbreitung in alle Richtungen. Ein aufmerksames Hinhören zeigt rasch, dass die Annahme recht grob ist. Es tönt ja in einem Raum nicht überall gleich.

3 Geometrische Raumakustik

Eine optimale Nachhallzeit in einem Raum garantiert also noch keine gute Hörsamkeit. Mit den Werkzeugen der geometrischen Akustik, heute häufig mit Hilfe des Computers, ist es aber möglich, Erkenntnisse zu den akustischen Verhältnissen an einzelnen Zuhörerplätzen zu gewinnen.

Wie in der Optik kann in der Akustik recht erfolgreich mit Schallstrahlen gearbeitet werden. Allerdings darf bei dieser Vereinfachung nie der Wellencharakter des Schalls vergessen werden. So sind z. B. kleine Reflektoren für tiefe Frequenzen, also grosse Wellenlängen, unwirksam.

Im Schnitt und im Grundriss sind zeichnerisch rasch wichtige Erkenntnisse zu gewinnen. Mit entsprechenden Überlegungen wird mit Hilfe des geometrischen Ansatzes sichtbar, dass es in einem Sitzungszimmer oder Vortragsraum günstig ist, das Mittelfeld der Decke schallhart zu gestalten (siehe Abb. 1). 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.

Es kann auch untersucht werden, ob bei der Abhörposition in einem Abhörraum eines Tonstudios keine unerwünschten Reflexionen eintreffen (siehe Abb. 7).

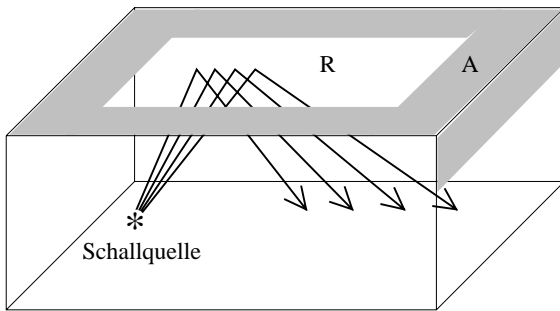


Abb. 1 Schallstrahlen die am schallharten Deckenspiegel reflektiert werden und nützliche Schallenergie in den hinteren Bereich des Vortragsaals bringen. R = reflektierende, A = absorbierende Flächen.

4 Raumakustische Simulation - Auralisation

Die rechnerische Simulation der Raumakustik grösserer Räume stützt sich auf die geometrische Akustik. Der Raum wird über ein Fadenmodell definiert, welches relativ grob bleiben darf (Abb. 2). Für jede Raumbegrenzungsfläche wird der Absorptionsgrad frequenzabhängig eingegeben.

Bei dem als Ray Tracing bezeichneten Verfahren werden unzählige Schallteilchen als Träger von Schallenergie von der Quelle in alle Richtungen abgestrahlt. An den Wandflächen werden die Teilchen je nach Wandeigenschaften spiegelartig oder gestreut reflektiert, und es wird ihnen entsprechend dem Schallabsorptionsgrad der Wand ein gewisser Betrag von Schallenergie entzogen. Beim Empfänger werden die auf einer kleinen Kugeloberfläche eintreffenden Schallteilchen registriert.

Ziel der Simulation ist die Berechnung der Raumimpulsantwort. Sie entspricht dem Schalldruckverlauf beim Empfänger, wenn an der Quelle in die Hände geklatscht wird, oder genauer, ein ganz kurzer Schallimpuls gesendet wird.

Bereits eine visuelle Inspektion der Raumimpulsantwort kann Hinweise auf Unregelmässigkeiten wie Echos und Flatterechos geben (Abb. 3). Aus der Raumimpulsantwort können schliesslich verschiedene raumakustische Masse wie z.B. die Nachhallzeit berechnet werden (siehe Abb. 4).

Das besondere an der Raumimpulsantwort ist aber, dass darin die gesamte Information zum Übertragungsweg von der Quelle zum Empfänger steckt. Damit öffnet sich der Weg, in Räume hinein zu hören, welche erst geplant sind (Auralisation). Unter Abschätzung der Geometrie und der Materialisierung lassen sich natürlich auch Situationen in nicht mehr bestehenden historischen Räume auralisieren.

Die raumakustischen Programme welche fähig sind, die oben erwähnten Aufgaben zu bewältigen, laufen heute problemlos auf dem PC. Zur Berechnung der Raumimpulsantwort an einem einzigen Empfangspunkt ist etwa eine Minute Rechenzeit notwendig. Für Berechnungen auf einer ganzen Hörerfläche muss entsprechend mehr Zeit eingesetzt werden (Beispiel siehe Abb. 4).

Für die Auralisation wird die Raumimpulsantwort mit nachhallfreier Musik oder Sprache mathematisch gefaltet. Auch dies ist auf einem PC mit guter Soundkarte möglich. Die korrekte Auralisation eines Spaziergangs durch einen Konzertsaal während eines Konzertes benötigt allerdings eine sehr viel höhere Rechenleistung und ist in Echtzeit damit noch schwierig zu realisieren.

Die Grundlagen der Computersimulation und der Auralisation werden auch bei Multimedia-Produkten benutzt, um das Audiosignal quasi im Raum hörbar zu machen.

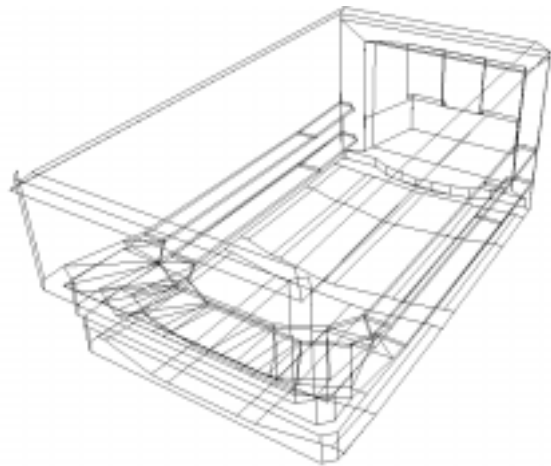


Abb. 2 Fadenmodell eines Raumes für die raumakustische Computersimulation (Boston Symphony Hall)

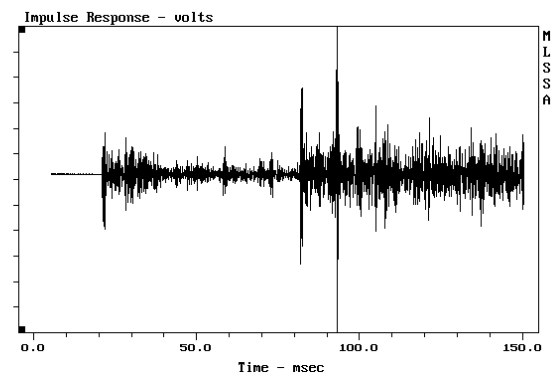


Abb. 3 Beispiel einer Raumimpulsantwort mit extremen Echoerscheinungen.

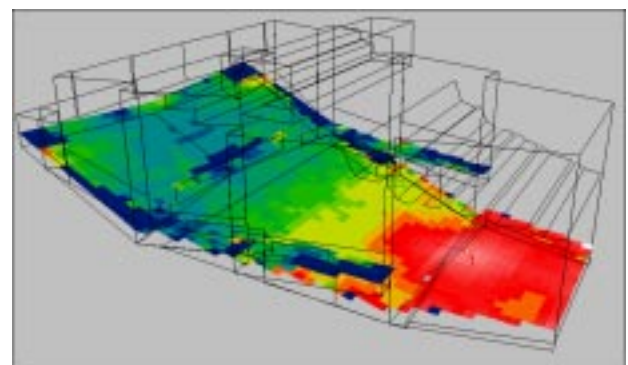


Abb. 4 Darstellung eines raumakustischen Masse in einem grossen Mehrzwecksaal.

5 Wellentheoretische Raumakustik

Grundsätzlich ist vor allem bei tiefen Frequenzen ein Versagen der geometrischen Methode zu erwarten. Die physikalisch exakte Auskunft über das Schallfeld in einem Raum müsste man durch Lösung der Wellengleichung erwarten, die sich in Form überlagerter Eigenschwingungen des Raumes präsentiert. 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 zum Glück gar nicht notwendig, das Schallfeld über den ganzen Frequenzbereich exakt zu kennen. Der wellentheoretische Ansatz ist aber wichtig, er liefert besonders bei kleinen Räumen unentbehrliche Ergebnisse im Bereich tiefer Frequenzen.

6 Folgerungen für kleine Räume

Bei kleineren Räumen spielen Eigenmoden tiefer Frequenzen eine grosse Rolle, weil die Eigenmodendichte in diesem Frequenzbereich noch nicht so gross ist. In Abb. 5 sind die starken örtlichen Schwankungen des Schalldrucks für eine Eigenschwingung tiefer Frequenz dargestellt.

Weiter ist der Frequenzgang der Übertragungsfunktion von Quelle zu Empfänger in einem kleinen Raum sehr unregelmässig. In Abb. 6 sind die Schwankungen schematisch dargestellt.

In Tonstudios, Musikproberäumen etc, wo ein linearer Frequenzgang gefordert wird, muss durch Bedämpfen des Raumes im Tieftonbereich mit Plattenschwingern, Helmholtzresonatoren oder den neu entwickelten, sehr wirksamen Verbundplattenresonatoren¹ Abhilfe geschaffen werden. Der Frequenzgang im Tieftonbereich wird, wie in Abb. 6 unten dargestellt, ausgeglichener.

Selbstverständlich sind in solchen Räumen auch im Mittel- und Hochtonbereich akustische Vorkehrungen zu treffen, was mit üblichen Schallabsorbieren oder auch mit variabler Absorption, wie z. B. mit Vorhängen in Musikproberäumen, möglich ist.

7 Akustische Gestaltung kleiner Räume für Multimedia, Videokonferenzen und Fernunterricht

Aus den bisherigen Ausführungen kann geschlossen werden, dass auch in kleinen Räumen die Raumakustik sorgfältig geplant werden muss. Je kleiner die Räume sind, um so mehr gilt dies für den Teilaspekt der tiefen Frequenzen. Besonders bei Räumen für Sprache ist auf eine kurze Nachhallzeit zu achten.

Abhörräume und Aufnahmestudios

Multimediaproduktionen werden mit Vorteil in speziellen Abhörräumen und Aufnahmestudios produziert. Für diese Räume gelten strenge Anforderungen. Für

Abhörräume sind in der Norm DIN 15996² verschiedene Bedingungen aufgeführt. Das Volumen der Räume sollte nicht zu klein sein. Längen, Breiten und Höhen sollten nicht in einem ganzzahligen Verhältnis stehen. Für die Nachhallzeit in Funktion der Frequenz ist ein enges Toleranzfeld definiert. Ausgangspunkt ist die Nachhallzeit bei 500 Hz, welche abhängig vom Volumen vorgeschrieben wird. Für einen Raum von 100 m³ sollte die Nachhallzeit z. B. zwischen 0.25 und 0.40 s liegen.

Die erwähnte Norm enthält übrigens auch Anforderungen an das Grundgeräusch.

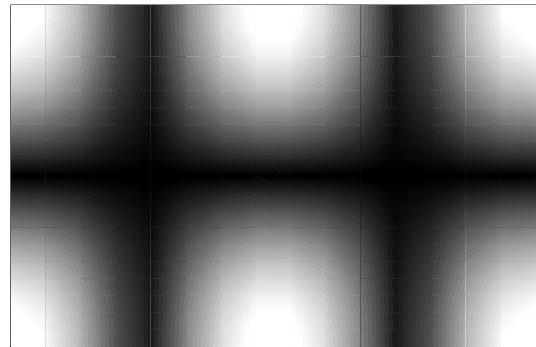


Abb. 5 Verteilung der Schalldruckamplituden in einem Raum von 3.4 m x 5.4 m bei einer Anregung mit einem Reinton der Frequenz 163 Hz; (weiss: Amplitude A = maximal, schwarz A = 0, Grautöne: A = 0 ... max).

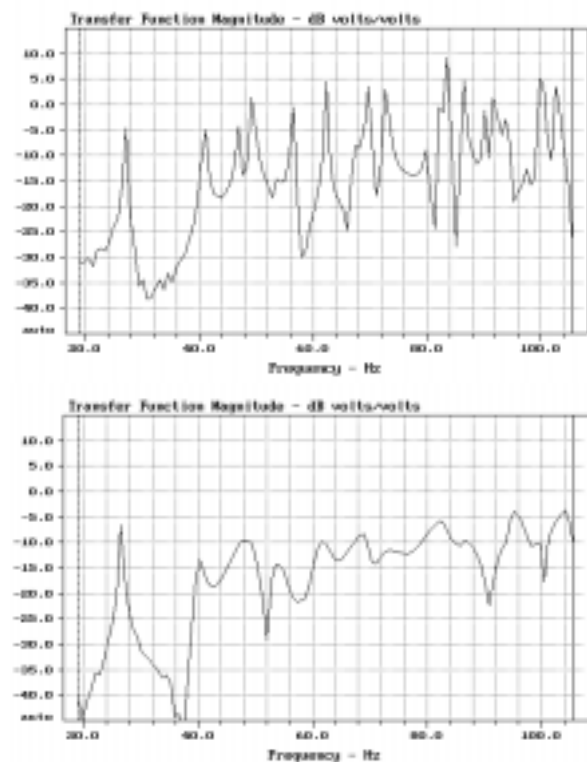


Abb. 6 Frequenzgang der Übertragung von der Quelle zum Empfänger in einem kleinen Raum.

Oben: Raum mit schallharten Flächen und damit schwach gedämpften Moden.

Unten: Gleicher Raum, im Tieftonbereich schallabsorbierend. Relativ ausgeglichener Frequenzgang.

Ein Beispiel eines Konzepts für einen Abhörraum ist in Abb. 7 dargestellt. In Tabelle 1 ist ein Zusammenstellung von Kriterien für den Entwurf von kleinen Abhöräumen gegeben. Weitere Hinweise auf die nicht einfache Gestaltung solcher Räume finden sich in der Fachliteratur.^{3, 4, 5}

Tabelle 1 Kriterien für den Entwurf kleiner Abhöräume:

Problem	Massnahme
Tiefe Frequenzen:	
Diskrete Eigenmoden. ⇒ Starke Schwankungen des Pegels im Frequenzgang und in Funktion des Ortes	<ul style="list-style-type: none"> • Tieftonabsorber (Plattenschwinger, Verbundplattenresonatoren, ...) • Raumform: Proportionen + ev. schräge Wände
Mittlere und hohe Frequenzen:	
Interferenzen von Direktschall und frühen Reflexionen ⇒ Klangverfärbung (Kammfilter)	<ul style="list-style-type: none"> • Raumform derart, dass keine Reflexionen vor 15ms nach Direktschall • Diffusoren
Nachhall ⇒ unerwünschte Beeinträchtigung des Raumklanges des Originalsignals	<ul style="list-style-type: none"> • Schallabsorber
Stereo-Lautsprecher	<ul style="list-style-type: none"> • Raum sollte symmetrisch sein.

Räume für Videokonferenzen und Fernübertragung von Lehrveranstaltungen

Wenn Räume für Videokonferenzen und andere Fernübertragungen nach den anerkannten raumakustischen Kriterien für Sprache⁶ ausgelegt sind, ist wohl ein erster guter Stand erreicht. Zu den damit verbundenen geometrischen Kriterien wurden bereits in Abschnitt 3 Hinweise gegeben. Für das Volumen ist etwa $3 - 5 \text{ m}^3$ pro Person einzusetzen und für die Nachhallzeit wird in Schulzimmern etwa mit einem Wert von 0.4 bis 0.5 s gerechnet. Für grössere Räume sind etwas höhere Werten möglich. Der Frequenzverlauf der Nachhallzeit sollte möglichst linear sein, bei tiefen Frequenzen aber eher etwas absinken. Die letzte Forderung hat wie in Abschnitt 5 dargelegt, positive Auswirkungen auf den Frequenzgang bei tiefen Frequenzen. Ihre Realisierung ist aber nicht immer einfach.

Wenn wie in Videokonferenzräumen und Räumen für Fernunterricht über Mikrofone Sprache in andere Räume übertragen wird, sollte eher eine etwas kürzere Nachhallzeit eingehalten werden⁴.

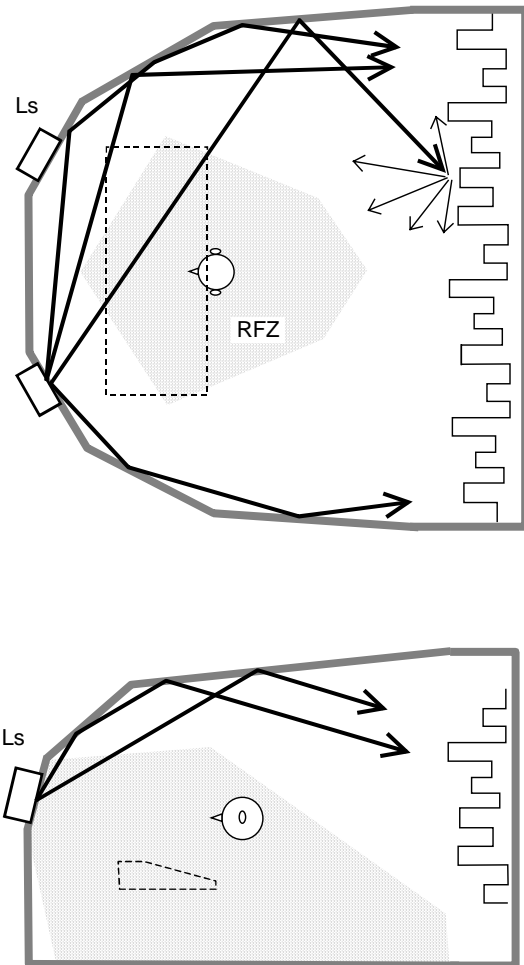


Abb. 7 Schematischer Grundriss (oben) und Schnitt (unten) eines Tonstudios. Die eingezeichneten Schallstrahlen zeigen, dass an der Abhörposition am Mischpult ein Zone ohne die unerwünschten frühen Reflexionen eingehalten werden kann (RFZ= reflection free zone, Ls = Lautsprecher). An der Rückwand sind Diffusoren vorgesehen, welche den eintreffenden Schall streuen. Ein bestimmter Teil der restlichen Decke und Wände sind als Tiefton- und Mittel-/Hochtonabsorber ausgebildet.

- ¹ FUCHS H.V., ZHA X., Wirkungsweise und Auslegungshinweise für Verbund-Platten-Resonatoren. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 43 (1996)
- ² DIN 15996: Elektronische Laufbild- und Tonbearbeitung in Film, Video- und Rundfunkbetrieben. Anforderungen an den Arbeitsplatz
- ³ BALLOU, G. (Editor), Handbook for Sound Engineers. The New Audio Cyclopedia. SAMS, USA, 1991
- ⁴ EVERST F. ALTON, Sound Studio Construction on a Budget. McGrawHill, 1997
- ⁵ VÖLKER, ERNST-JOACHIM, Zur Bedeutung der ersten 15 ms bei der Beurteilung von Schallaufnahmen im Regieraum. Diss., Techn. Univ. Berlin, 1996
- ⁶ DIN 18041. Hörsamkeit in mittleren und kleinen Räumen. FASOLD W., VERES E., Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Verlag für Bauwesen. 1998