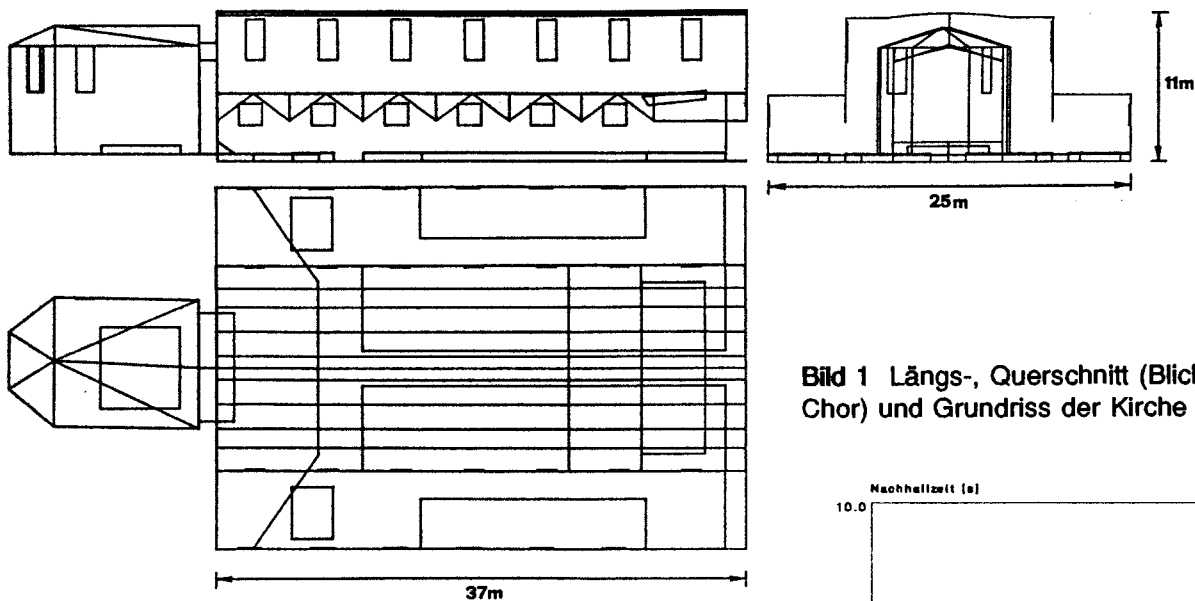


**Erfahrungen mit zwei kommerziellen Raumakustik-Simulations-Programmen**
**K. EGGENSCHWILER**

(Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, Abt. Akustik, CH-8600 Dübendorf)

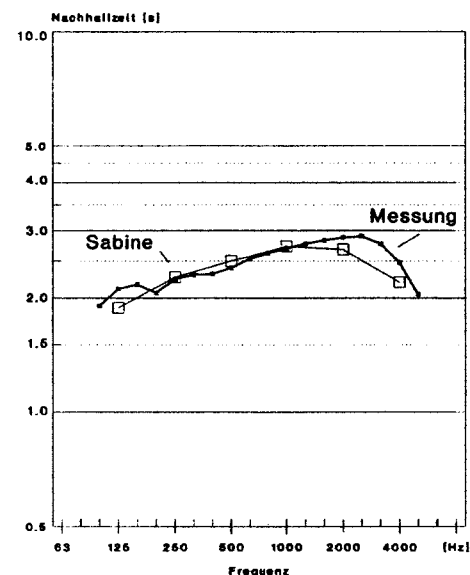
**1. Einleitung**

Die Nachhallzeit eines grösseren Kirchenraumes wurde mit zwei Simulationsprogrammen (dBRay und EPIDAURE) sowie mit der Formel von Sabine berechnet und mit Messungen im realen Raum verglichen. Eine Besonderheit der Kirche (Volumen  $8'000 \text{ m}^3$ ) besteht darin, dass ca. 90% der Decke des Hauptschiffes mit einer schallabsorbierenden heruntergehängten Decke versehen ist. Der Raum eignet sich besonders für die Untersuchung, weil Proben der absorbierenden Decke im eigenen Hallraum gemessen wurden, und zudem die Geometrie gut bekannt ist (Bild 1). Die akustische Qualität ist nicht Gegenstand der Untersuchung.


**Bild 1** Längs-, Querschnitt (Blickrichtung Chor) und Grundriss der Kirche

**2. Nachhallzeit-Messung und Berechnung mit der Formel von Sabine**

Die Nachhallzeit-Messungen im unbesetzten Raum an neun Messpositionen ergaben im Mittel den in Bild 2 dargestellten Verlauf (•). Im Bereich der Oktavbänder 500Hz, 1kHz beträgt der Mittelwert 2.7 s. Die Resultate einer konventionellen Berechnung mit der Formel von Sabine (Bild 2: □) stimmen sehr gut mit den gemessenen Werten überein.


**Bild 2** Nachhallzeitmessung und Resultate der Sabine-Berechnung

### 3. Die Raumakustik-Simulationsprogramme dBRay und EPIDAURE

Es standen zwei kommerziell erhältliche Programme zur Verfügung:

- **dBRay** (Ver.2.3) ist ein Programm nach dem klassischen Ray-Tracing Verfahren [1]. Von der Quelle werden Schallstrahlen ausgesendet, an den Raumbegrenzungsflächen geometrisch reflektiert und schliesslich von Empfängerkugeln aufgefangen. Es besteht die Möglichkeit einer "diffusen" Reflexion: Der Schallstrahl wird innerhalb eines definierten Konus (z.B. 20° Öffnungswinkel) zufällig reflektiert. Der Radius der Empfängerkugel kann entweder konstant oder mit wachsendem Schallweg (bis zu einem einstellbaren Grenzradius) expandierend eingestellt werden.
- **EPIDAURE** (Ver. 1.1) ist die auf PC implementierte Version des gleichnamigen Programms des CSTB, Grenoble (F). Zur Berechnung der Echogramme wird das Spiegelquellenverfahren benutzt, wobei die Spiegelquellen auf schnelle Weise mit der sogenannten "beam method" gefunden werden [2], ähnlich dem Verfahren von Vorländer [3]. Die Spiegelquellen werden bis zu einer max. Ordnung N berechnet. Der weitere Verlauf des Echogramms wird durch ein statistisches Verfahren ergänzt. Als erste Annäherung kann die Nachhallzeit des Raumes mit einem auf Ray-Tracing beruhenden, schnellen statistischen Verfahren ermittelt werden [4]. Die Nachhallzeit berechnet sich aus der mittleren Weglänge, deren Standardabweichung und dem mittleren Absorptionsgrad.

### 4. Ergebnisse der Simulation mit dBRay

Es wurde die mittlere Nachhallzeit T30 aus den Echogrammen sechs verschiedener Hörerplätze ermittelt. Immer im Rahmen der Empfehlungen der Gebrauchsanleitung [1] wurden die folgenden Berechnungsparameter variiert: Dichte der ausgesendeten Strahlen, Max. Winkel für die "diffuse" Reflexion, Radius der Empfängerkugel. Die berechneten Nachhallzeiten sind im Vergleich zu den Messungen durchwegs zu hoch. Die Mittelwerte der Oktavbänder 500Hz, 1kHz liegen im Bereich von 3.8 ... 7.1s (Messung 2.7s). Im Bild 3 sind als Beispiel die Nachhallzeitverläufe von drei typischen Versuchen im Vergleich zur Messung dargestellt: Bei gleicher Dichte der ausgesendeten Strahlen (Ca. ein Strahl pro Raumwinkel 2°x2°) wurde der maximale Winkel  $\alpha$  der "diffusen" Reflexion variiert (+:  $\alpha=0^\circ$ , x:  $\alpha=5^\circ$ , □:  $\alpha=10^\circ$ ). Nur im Hochtonbereich stimmen die Werte mit der Messung etwa überein. Bei diesen Frequenzen wirkt vor allem die Luftabsorption, welche rechnerisch problemlos zu bewältigen ist.

Die Ursache für die z.T. sehr grossen Abweichungen liegt vor allem darin, dass die Absorption ausschliesslich auf der Decke konzentriert ist und der Raum parallele Seitenwände aufweist. Es ist anzunehmen, dass die Seitenwände im realen Raum einen grossen Anteil diffuser Reflexion und Beugung aufweisen (Säulen, Bögen, Fensternischen, Öffnung ins Seitenschiff). In dem auf geometrischer Akustik beruhenden Simulationsverfahren pendeln jedoch viele Schallstrahlen häufig ungedämpft zwischen den parallelen Seitenwänden

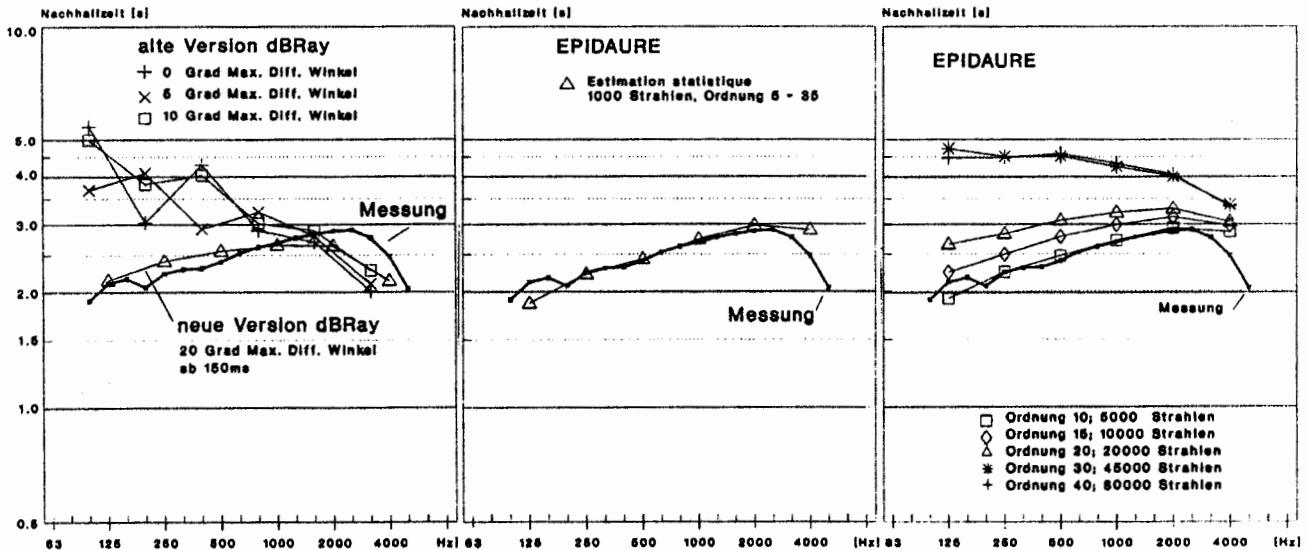


Bild 3 Resultate der Versuche mit dBRay

Bild 4 Nachhallzeit mit der statistischen Methode mit EPIDAURE

Bild 5 Nachhallzeit aus Echogrammen, Max. Ordnung 10 ... 40 mit EPIDAURE.

hin und her, bevor sie auf eine Empfänger­kugel treffen. Dies wirkt sich verlängernd auf den Nachhall aus. Eine weitere Ursache für die Abweichungen ist die Wahl des Empfänger­radius. Mit dem nach Anleitung gewählten fixen Radius (variierend je nach Empfangs­ort < 0.5m) wurden viel zu wenige Strahlen eingefangen.

Nach einer entsprechenden Mitteilung an die Herstellerfirma erstellte sie eine neue Version des Programmes. Als optimaler Öffnungswinkel  $\alpha$  des Konus für die zufällige "diffuse" Reflexion wird jetzt 20° empfohlen, wobei Schallstrahlen die jünger sind als 150ms noch rein geometrisch reflektiert werden. Weiter wurde die Anwendung eines bis zu einem Grenzwert von 1.5m expandierenden Empfangsradius empfohlen. Ein nochmaliges Durchlaufen der Simulation mit der neuen Version ergab nun eine gute Übereinstimmung mit den Messungen (Bild 3  $\Delta$ ). Die Rechenzeit betrug insgesamt 9h (auf PC 486/33MHz).

## 5. Ergebnisse der Simulation mit EPIDAURE

### 5.1 Berechnung mit statistischem Verfahren

Die Resultate mit dem von EPIDAURE angebotenen schnellen Verfahren zur Berechnung der Nachhallzeit mit einer statistischen Methode [4] zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten, wenn mit den in der Anleitung empfohlenen Parameter-Einstellungen gerechnet wird (Bild 4). Rechenzeit: 2 Minuten (PC 486/33MHz).

### 5.2 Berechnung aus den Echogrammen

Wenn die die Nachhallzeit T30 aus den durch Simulation ermittelten Echogrammen verschiedener Hörerplätze berechnet wird, dann spielt die Wahl der Berechnungsparameter eine grosse Rolle. Bild 5 zeigt das Resultat einer Versuchsreihe, bei der die max. Ordnung der Spiegelquellen von 10 bis 40 variiert wurde. Die berechneten Nachhallzeiten stimmen

bei der max. Ordnung 10 gut mit den Messwerten überein. Die Prognosen weichen aber um so mehr von den gemessenen Werten ab, je grösser die max. Ordnung gewählt wird, wobei der Nachhall mit wachsender Ordnung länger wird. Im Hochtonbereich ist die Übereinstimmung wie bei dBRay bei allen Versuchen recht gut. Die Rechenzeit für die Echogramme von 6 Empfangspunkten betrug bei max. Ordnung 10 rund 7 Minuten, bei max. Ordnung 40 rund 4 h (PC 486/33MHz).

Die Ursache der zum Teil grossen Abweichungen ist im Prinzip die gleiche wie oben (in Abschnitt 4) beschrieben: Je höher die Ordnung der berücksichtigten Spiegelquellen, desto mehr werden die im Modellraum praktisch ungedämpft zwischen den Seitenwänden hin- und herlaufenden Schallstrahlen im Echogramm gewichtet. In der Anleitung von EPI-DAURE wird leider gerade dann die Wahl einer hohen Ordnung suggeriert, wenn die Absorption auf eine einzige Fläche konzentriert ist. Auf den wichtigen Unterschied, ob die Wände vorzugsweise diffus oder geometrisch reflektieren, wird nicht hingewiesen. Nimmt man im vorliegenden Beispiel aber diffus reflektierende Seitenwände an, dann muss die max. Ordnung der Spiegelquellen niedrig gewählt werden, um die um die Reflexionen zwischen den parallelen Seitenwänden nicht übermässig zu gewichten. Der fehlende Teil des Echogramms kann mit dem statistischen Verfahren ergänzt werden.

Von der Firma 01dB, welche das Programm vertreibt, wurden auf Anfrage Beurteilungskriterien mitgeteilt, mit welchen der Einfluss der diffusen Reflexion abgeschätzt werden kann: Einerseits soll der Verlauf der mittleren Absorption in Funktion der Ordnung der Spiegelquellen bei der Berechnung der Echogramme beobachtet werden. Andererseits sind diese Werte mit der mittleren Absorption zu vergleichen, welche sich bei der statistischen Methode (siehe 5.1) ergibt. Mit solchen Überlegungen gelangt man im hier vorgestellten Beispiel zum Schluss, dass mit max. Ordnung 10...12 gerechnet werden sollte.

## 6. Folgerungen

Es wurden zwei kommerzielle Raumakustik-Simulations-Programme untersucht. Die Berechnungen ergeben nur dann richtige Resultate, wenn die Programm benutzer bei der Festlegung der Berechnungsparameter ihre Erfahrungen einfließen lassen, und z.B. richtig abschätzen, ob Wandflächen vorwiegend geometrisch oder diffus reflektieren. Die Gebrauchsanleitungen bieten dem Anwender zur Zeit leider noch ungenügende Hilfestellungen. Auffallend ist im übrigen, dass auch in der Literatur sehr wenige Angaben zur praktischen Handhabung von raumakustischen Prognoseprogrammen zu finden sind, und zudem Vergleiche von Prognose-Ergebnissen mit Messungen nicht sehr zahlreich sind.

## Literatur

- [1] Program dBRay. Acoustic ray tracing program. Version 2.3. December 1991. RTA Technology Pty Ltd, 160 Castlereagh St., Sydney NSW 2000, Australia.
- [2] Maercke D.V., Martin J., The Prediction of echograms and impuls responses with the epidaure software. CSTB, Room Acoustic Group, Saint Martin d'Here, Frankreich.
- [3] M. Vorländer, Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des raumakustischen Schallteilchenmodells. Dissertation RWTH Aachen.
- [4] Maercke D.V., A new approach to reverberation of ergodic sound fields. CSTB, Saint Martin d'Here.