Die Nachhallakustik großer langgestreckter Räume

G. Graber[1], P. Gutmann[1], M. Fellner[2], F. Grazf[2], T. Rohde[3], H. Egger[3]

[1] *Technische Universität Graz, 8010 Graz, Österreich, Email: graber@tugraz.at*
[2] *Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, A-8010 Graz, Österreich, Email: maria.fellner@joanneum.at*
[3] *Technisches Büro, A-8010 Graz, Österreich, Email: office@rohde.at, jegger@chello.at*

1. Einleitung

Im Rahmen des Projekts „Zur Akustik des Doms zu St. Stephan in Wien“ wurden umfangreiche raumakustische Messungen durchgeführt [1] [2]. Für die im Projekt notwendige ortsabhängige Darstellung der unterschiedlichen akustischen Parameter wurde ein Visualisierungstool entwickelt, das zunächst kurz vorgestellt wird.

Im zweiten Teil des Beitrags wird auf ein Phänomen des Nachhallverlaufs in langgestreckten Räumen eingegangen. Bei der ortsabhängigen Darstellung der Nahhallzeit fällt auf, dass diese nicht wie erwartet mehr oder weniger im gesamten Kirchenschiff konstant ist, sondern dass mit zunehmender Entfernung von der Schallquelle ein gleichmäßiges Ansteigen der Nachhallzeit zu beobachten ist. Mit den umfangreichen Möglichkeiten des Visualisierungstools wird gezeigt wodurch dieses Phänomen zustande kommt und wie es erklärt werden kann.

2. Visualisierungstool

Das Visualisierungstool (MVT) wurde in Matlab entwickelt und bietet zwei Hauptpunkte [3]:

1. räumliche Darstellung von Messparametern
2. Berechnung des Energie-Zeit-Verlaufs (EZV) aus den Impulsantworten und räumliche Darstellung der Energieverhältnisse in Abhängigkeit von der Zeit ($E_{Oktav}(t)$, $E_{Terz}(t)$, $E_{breitbandig}(t)$).

Die Daten werden in einer Excel-Tabelle mit den räumlichen Koordinaten und den Namen der Impulsantworten eingegeben. Die Darstellungsfeatures umfassen im Wesentlichen 3D-Darstellung der Messdaten, Vergleich von Messdaten (vgl. Abbildung 1) und das Erstellen von Animation zur Darstellung der Veränderung von Messparametern, wie z.B. die Änderung der Nachhallzeit im Raum in Abhängigkeit von der Frequenz.

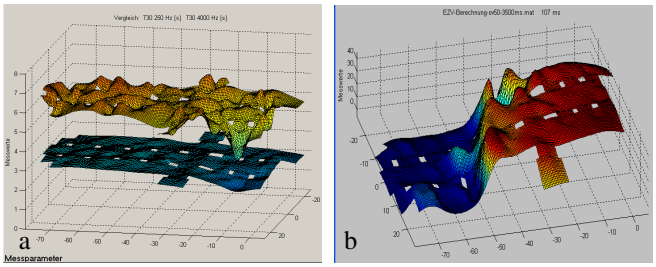

Abbildung 1: Darstellungsfeatures des MVT:
a) Vergleich der Nachhallzeit bei 250 Hz und 4000 Hz;
b) Energie-Zeit-Verlauf für t = 167 ms

3. Nachhall in langen Räumen – Fragestellung

Abbildung 2 zeigt das Messpunktraster für das Projekt im Stephansdom mit 213 Messpunkten und dem Quellpunkt Q2t, worauf sich die folgenden Auswertungen beziehen.

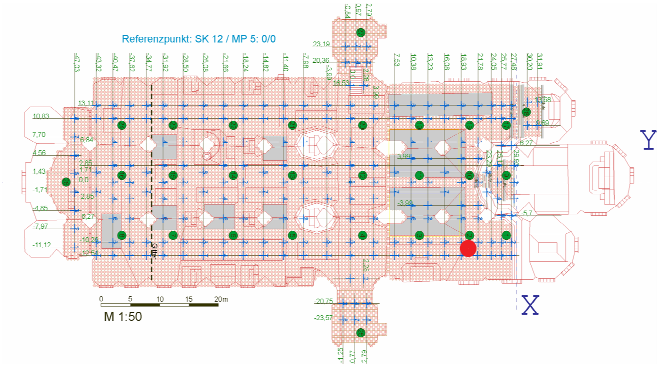

Abbildung 2: Messpunktraster für die Hauptmessung (213 Messpunkte) und Quellpunkt Q2t (rot) im Stephansdom zu Wien

Die Darstellung der ersten Simulation der Nachhallzeit für den Stephansdom bei 2 kHz zeigt mit zunehmender Entfernung von der Quelle einen Abfall der Nachhallzeit, die Messdaten zeigen im Gegensatz dazu allerdings einen gleichmäßigen Anstieg (vgl. Abbildung 3). Da ein systematischer Messfehler ausgeschlossen werden konnte, wurde die Simulation so kalibriert, dass sie den in den Messdaten vorhandenen Anstieg der Nachhallzeit mit zunehmender Entfernung von der Quelle aufweist, was jedoch nur für die vorderen 2/3 des Raumes funktionierte.

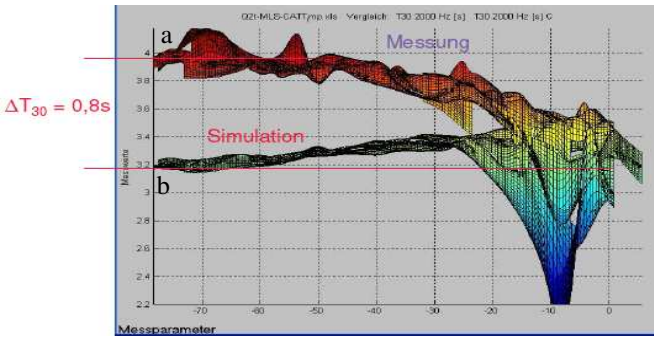

Abbildung 3: Diskrepanz in der Nachhallzeit bei 2 kHz am rückwärtigen Ende des Kirchenschiffs (= links) zwischen a) Messung und b) Simulation; Quelle vorne (= rechts)

Es blieb also die Frage, wie dieser Anstieg der Nachhallzeit erklärt werden kann, insbesondere deshalb, weil der in der Simulation vorhandene Nachhallverlauf bei 2 kHz durch die Luftdämpfung eine gewisse Plausibilität aufweist. In [4] wird dieses Phänomen zwar beschrieben nicht jedoch erklärt.

4. Lösungsansatz

Der Lösungsansatz ergab sich durch die Darstellung des Energie-Zeit-Verlaufs. Zum Zeitpunkt $t_1 = 75$ ms hat der Direktschall etwa die Hälfte des Weges in Längsrichtung durchlaufen, in Querrichtung zum Kirchenschiff ist bereits diffuser Nachhall vorhanden. Zum Zeitpunkt $t_2 = 300$ ms hat sich im gesamten Raum diffuser Nachhall eingestellt, allerdings mit einem Gefälle der Energiedichte von vorne nach hinten um 12 dB (vgl. Abbildung 4, a).

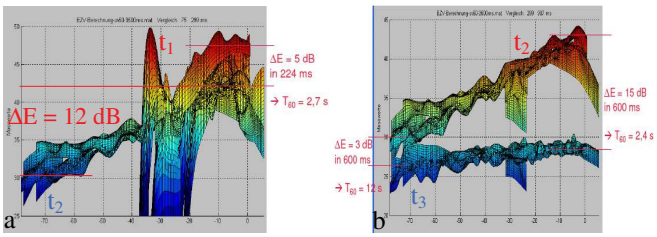

Abbildung 4: Energie-Zeit-Verlauf bei a) $t_1 = 75$ ms und $t_2 = 300$ ms sowie b) $t_2 = 300$ ms und $t_3 = 900$ ms

Lässt man die Zeit weiterlaufen, so zeigt sich, dass von $t_2 = 300$ ms bis $t_3 = 900$ ms im Bereich der Quelle der Nachhallpegel um 15 dB abnimmt (in Abbildung 4 b rechts), im Bereich gegenüber der Quelle der Nachhallpegel jedoch nur um 3 dB abnimmt (in Abbildung 4, b links). Das Energiegefälle zum Zeitpunkt t_2 hat also zur Folge, dass in den anschließenden 600 ms ein Energieausgleich zwischen vorne und hinten stattfindet. Während dieses Ausgleichsprozesses nimmt vorne der Nachhallpegel ganz normal ab, im hinteren Bereich kann er jedoch nicht abnehmen, da wegen des Ausgleichsvorgangs laufend von vorne Hallenergie nachgeschoben wird. Im hinteren Bereich bleibt also der Nachhallpegel während des Ausgleichsvorgangs nahezu konstant.

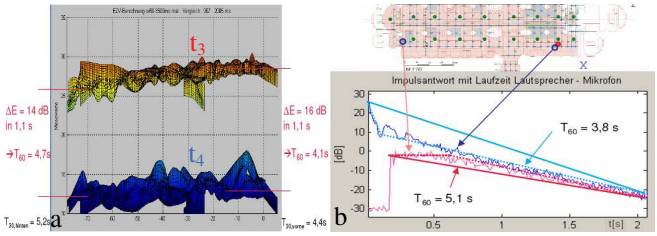

Abbildung 5: a) Energie-Zeit-Verlauf bei $t_3 = 0{,}9$ s und $t_4 = 2$ s sowie b) Impulsantwort 2kHz-Oktave vorne direkt neben der Quelle (blau) und hinten (rot)

Sobald der Ausgleichsvorgang zum Zeitpunkt $t_3 = 0{,}9$ s abgeschlossen ist, nimmt im gesamten Raum der Nachhallpegel gleichmäßig ab (vgl. Abbildung 5 a).

Der Ausgleichsvorgang ist auch in den Impulsantworten deutlich zu sehen. Abbildung 5 b zeigt in der blauen Kurve die Impulsantwort in Quellnähe, die nach dem steilen Abklingen des Direktschalls in den ersten 70 ms einen gleichmäßigen Abfall aufweist und eine Nachhallzeit von ca. 3,8 s ergibt. Die Impulsantwort am hinteren Raumende (blaue Kurve) zeigt neben dem verzögerten Beginn durch die akustische Laufzeit deutlich den konstanten Pegel während der ersten 600 ms, der durch das Nachschieben der Schallenergie von vorne während des Ausgleichsvorgangs zustande kommt. Daher ergibt sich die längere Nachhallzeit von 5,1 s.

5. Kontrollmessung

Zur Überprüfung dieser Interpretation wurde im Kellergang des Instituts (LxBxH: 55 x 2,5 x 3 m) eine Vergleichsmessung durchgeführt [5]. Abbildung 6 zeigt, dass tatsächlich die Nachhallzeit am Gangende mit der Quelle deutlich kürzer ist als am gegenüberliegenden Ende.

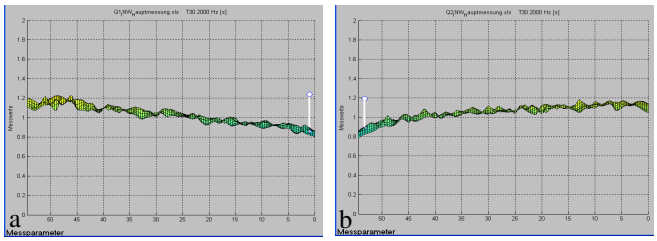

Abbildung 6: Nachhallzeit des Kellergangs mit a) Quelle rechts und b) mit Quelle links

Der Energie-Zeit-Verlauf in Abbildung 7 zeigt ebenso zunächst zum Zeitpunkt $t_1 = 163$ ms ein Energiegefälle von der Quelle zum gegenüberliegenden Gangende, das sich bis zum Zeitpunkt $t_2 = 650$ ms ausgleicht und dann gleichmäßig im gesamten Gang abklingt.

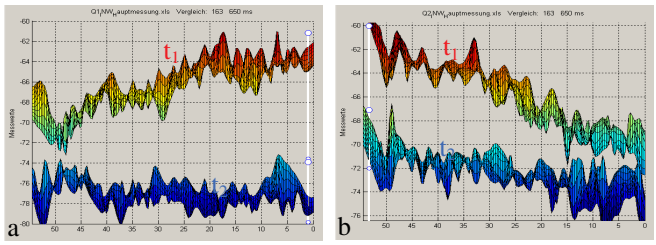

Abbildung 7: Energie-Zeit-Verlauf im 2 kHz-Oktavband im Kellergang bei $t_1 = 163$ ms und $t_2 = 650$ ms mit a) Quelle rechts und b) Quelle links

6. Zusammenfassung

Nach der kurzen Vorstellung des Visualisierungstools wurde gezeigt, dass in langgestreckten Räumen mit der Quelle an einem Raumende sich zunächst an der Quelle eine höhere Energiedichte einstellt als am gegenüberliegenden Raumende. Während des folgenden Ausgleichsvorgangs bleibt der Nachhallpegel am der Quelle gegenüberliegenden Raumende nahezu konstant, was dazu führt, dass die Nachhallzeit im Raum mit zunehmender Entfernung von der Quelle steigt. Wünschenswert wären Simulationsprogramme, die diesen Umstand berücksichtigen.

7. Literatur

[1] M. Fellner, F. Graf, et. al: *Untersuchungen und wissenschaftliche Forschungen zur Akustik und musikalischen Aufführungspraxis des Domes zu St. Stephan in Wien mit dem Ziel der Ausarbeitung von Verbesserungsmöglichkeiten*, Österreichische Nationalbank, Wien, 2005

[2] M. Fellner, F. Graf, et. al: *Zur Akustik im Dom zu St. Stephan in Wien,* DAGA2006, Braunschweig, 2006

[3] G. Weber: *MVT - Matlab Visualisierungs Tool*, Projektarbeit, IBK/TU-Graz, 2005

[4] E. Cirillo, F. Martellotta: *Sound propagation and energy relations in Churches*, JASA Vol. 118, S232-248, 2005

[5] P. Gutmann: *Nachhallakustik langgestreckter Räume*, Projektarbeit, IBK/TU-Graz, 2006