Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Raumakustik in Kirchen

Room acoustics in churches

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

(Betreuer) Ao. Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. Thomas Bednar
und
Univ. Ass. Dipl. Ing. Dr. Clemens Hecht

am

Institut für Hochbau und Technologie

Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz

E 206/2

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

(Verfasser) Florian Ehrlich

E 610 / 9925734

Nestroygasse 4

1140 Wien

Wien, am 11.12.2009 Florian Ehrlich

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS A2
DANKSAGUNG: A5
ZUSAMMENFASSUNG: A6
ABSTRACT: A7

1 Aufgabenstellung 1
2 Einleitung 2
2.1 Allgemeine Einführung 2
2.2 Untersuchtes Objekt 5
2.2.1 Geschichte des Bauwerks 6
2.2.2 Nutzung 9
2.2.2.1 In der Vergangenheit 9
2.2.2.2 Im heutigen Gottesdienst 11
2.2.2.3 Für Konzerte 12
2.3 Akustische Grundlagen 12
2.3.1 Nachhallzeit 12
2.3.1.1 Hinführung 14
2.3.1.2 Definition 33
2.3.2 Energiekriterien 35
2.3.2.1 Deutlichkeit 37
2.3.2.2 Durchsichtigkeit, Klarheitsmaß 37
2.3.2.3 Schalldruckpegelabnahme 38
2.3.2.4 Schwerpunktzeit 38
2.3.2.5 Seitenschallgrad 38
2.3.3 Grenzwerte 39
3 Bisherige Ergebnisse 40
3.1 Überblick 40
3.2 Ergebnisse vom Juni 2006 42
4 Durchführung 42
4.1 Geometrie 42
4.1.1 Ausgangspunkt, Quellen 42

4.1.2 Erhebung 42
4.1.3 Ergebnisse 43
4.2 Simulation 44
4.2.1 Allgemein 44
4.2.2 Funktionsübersicht der Software 45
4.2.3 Eingangsgrößen 46
4.2.4 Modellerstellung 48
4.2.5 Simulationsdurchgänge 54
4.2.6 Problematik, Schwierigkeiten 59
4.2.7 Anpassung an die Nachhallzeit 60
4.2.8 Ergebnisse 63
4.2.9 Vorbereitung des Messprogrammes 65
4.3 Messung vom 29.12.2009 78
4.3.1 Messgeräte 78
4.3.1.1 Norsonic RTA 840 78
4.3.1.2 Mikrofone 80
4.3.1.3 Kalibrierung 80
4.3.2 Schallquelle 81
4.3.3 Zu bestimmende Größen 82
4.3.4 Messaufbau 83
4.3.5 Messergebnisse 86
4.4 Befragung 90
4.4.1 Ziele 90
4.4.2 Erste Befragung am 6.6.2009 91
4.4.2.1 Vorbereitung 91
4.4.2.2 Durchführung 92
4.4.2.3 Ergebnisse 93
4.4.2.4 Probleme 96
4.4.3 Zweite Befragung am 19.6.2009 98
4.4.3.1 Verbesserung der ersten Befragung, Vorbereitung 98
4.4.3.2 Durchführung 98
4.4.3.3 Ergebnisse 100
4.4.4 Zusammenfassung 104

5 Ergebnisse, Ausblick 110

ABBILDUNGSVERZEICHNIS: A7
TABELLENVERZEICHNIS: A12
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS: A13
LITERATURVERZEICHNIS: A14

DANKSAGUNG:

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mir diese Arbeit ermöglicht haben bzw. mich im Vorfeld unterstützt haben, damit es überhaupt bis zur Diplomarbeit gekommen ist.
Gleichzeitig mögen mir alle nachsehen, die ich jetzt nicht namentlich erwähnen kann, weil es sonst den Rahmen dieser Seite sprengen würde – Herzlichen Dank für alles.

Zu den Leuten, die mich persönlich unterstützt haben zählen sicher meine Eltern, die mir als Hauptsponsoren diese Studienjahre ermöglicht haben und mich in schwierigen Studienphasen begleitet haben. An nächster Stelle sei meiner restlichen Familie, meinen Freunden und Bekannten gedankt, die mir in welcher Form auch immer, zur Seite gestanden sind.

Als nächstes will ich allen danken, die diese Arbeit ermöglicht haben. An erster Stelle sei mein Betreuer, Herr Prof. Dr. Thomas Bednar genannt, der meine sonderbare Idee zu einer Diplomarbeit werden ließ. Gedankt sei allen Mitarbeitern des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz, die mir in der Phase der Diplomarbeit und auch davor mit Rat und Tat zur Seite standen.
Zwei dieser Mitarbeiter möchte ich vor den Vorhang holen und mich besonders für die Unterstützung bei den akustischen Messungen bedanken: DI. Hannes Konder und Ing. Harald Hofbauer.

Mein Dank geht an die Pfarre Mariabrunn in Person des hw. Herrn Pfarrmoderators Dr. Marek Stasiowski und vielen anderen Mitarbeitern, die mir die wissenschaftliche Betrachtung der Kirche ermöglicht haben.

Nicht vergessen werden darf der Chor „Voices4you“, ohne den die Publikumsbefragungen nie möglich geworden wären. Mit dem Ensemble habe ich als Ausgleich in den Studienjahren viel gesungen. Danke!

Und ganz am Ende will ich allen danken, die mich in der heißen Phase der Fertigstellung unterstützt haben in welcher Form auch immer und noch nicht genannt wurden – Meiner Freundin Sabine.

ZUSAMMENFASSUNG:

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der raumakustischen Analyse einer barocken Kirche am Stadtrand von Wien.

Ziel der Arbeit war es, ein möglichst wirklichkeitsgetreues Modell zu entwickeln, mit dem man bestimmte räumliche Bereiche der Kirche akustisch betrachten kann.
Es sollte eine „virtuelle Kirche“ entstehen, in der man durch beliebige Wahl von Sendepunkten ein möglichst umfassendes Bild der raumakustischen Situation in Form von Nachhallzeiten und Energiekriterien simuliert. Durch diese Messungen können die akustisch besten Standpunkte, zum Beispiel für den Chor, festgelegt werden.

Das Modell, welches auf überprüften historischen Plänen des Objekts sowie Ansatzwerten aus der Literatur aufbaut, wurde zusätzlich durch in-situ-Messungen kalibriert. Abschließend konnten die Simulationsergebnisse des entwickelten Modells mittels neuerlicher Messungen verifiziert werden. Darüber hinaus wurden Personen über ihren subjektiven Eindruck der Akustik in der Kirche befragt.

Obwohl das entwickelte Modell die reale akustische Situation gut repräsentiert, könnten Detailbereiche noch durch zum Beispiel Analyse der lokalen streuenden Eigenschaften verbessert werden. Für qualitativ richtige Aussagen im Zusammenhang mit der Raumakustik dieser Kirche ist das Modell im Stande überblicksartig auf Fragestellungen einzugehen. Zum Beispiel die Frage, ob ein bestimmter Standort für einen Sprecher oder Chor geeignet ist, lässt sich damit beantworten.

Die Akustik des untersuchten Kirchenraumes ist für bestimmte Zwecke nicht gut geeignet. Da der Raum eine relativ hohe Abnahme des Schalldruckpegels hat, erscheint den entfernter Sitzenden vieles zu leise. Auch die Textdeutlichkeit leidet mit der entsprechenden Entfernung. Dieses Problem wurde bisher recht gut mit elektroakustischen Maßnahmen beseitigt.

ABSTRACT:

The master thesis deals with the room-acoustic analysis of a baroque church in the outskirts of Vienna.

The aim of the work was to develop a very realistic model with which one can look at certain spatial areas of the church acoustically.
There should originate a „virtual church“, in which one simulates a very comprehensive picture of the space-acoustic situation in the form of reverberation times and energy criteria by any choice of broadcasting points. The acoustically best positions can be fixed by these measurements, for example, for the choir.

The model which is based on checked historical plans of the object, as well as beginning values from the literature was calibrated, in addition, by In-situ measurements. Finally the simulation results of the developed model could be verified by means of recent measurements. In addition, people were questioned about her subjective impression of the acoustics in the church.

Although the developed model represents the real acoustic situation well, detailed areas could be still improved by for example analysis of the local scattering qualities. For qualitatively right statements in connection with the acoustics of this church the model is able to answer overview-like questions. For example, the question whether a certain location is suitable for a speaker or choir can be answered with it.

The acoustics of the examined church space are not suitable for certain purposes well. Because the space has a relatively high decrease of the sound pressure level recorder, a lot seems to the distant seated too quiet. Also the text clearness suffers with the suitable distance. This problem was removed up to now rather well with electric-acoustic measures.

1 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit soll die Erfassung und Analyse der Raumakustik einer Kirche sein. Durch die Erstellung eines Modells der Kirche, das durch Messungen verifiziert werden soll, soll man in der Lage sein können, sämtliche akustische Parameter an jedem beliebigen Punkt der Kirche berechnen zu können. Ergänzend dazu soll durch die Kontrolle des gesamten Modells mittels Vor-Ort-Messungen gewährleistet sein, dass die Ansätze für die Oberflächen auch plausibel sind.

Als Studienobjekt wurde eine Barockkirche mit reichhaltig verzierter Inneneinrichtung, im Westen Wiens gewählt. Als Hilfsmittel für die Bearbeitung stehen akustische Messgeräte (Schalldruckpegelmessgerät inkl. Mikrofone), sowie eine Software zur akustischen Modellierung des Objekts zur Verfügung.

Als Basis für die Erstellung der „virtuellen Kirche“ dienen Pläne und Literaturangaben zur Beschreibung des Oberflächenverhaltens. Als Ergänzung zu Modell und Vor-Ort-Messung soll eine Publikumsbefragung nach einem Chorkonzert Aufschluss über die Brauchbarkeit der Ergebnisse bringen.

2 Einleitung

2.1 Allgemeine Einführung

Akustik einst – in der Barockzeit – und jetzt?

Wenn von Akustik die Rede ist, dann ist dabei in vielen Fällen die Raumakustik gemeint, außer es geht um störende Geräusche. In weiterer Folge fallen einem dann die antiken griechischen und römischen Theater ein. Und im nächsten Schritt wird über die gute Akustik von (manchen) Konzertsälen geschwärmt.

Am Beginn dieser Arbeit, noch bevor die raumakustische Betrachtung des Objektes beginnen soll, oder die Erklärung einiger Betrachtungsparameter soll ein anderer Ausgangspunkt im Vordergrund stehen.
Das griechische Theater.

In einem Buch [Rei79] über gute Akustik fanden sich nie geführte niedergeschriebene Gespräche von Professor Reichardt (Dresden) mit verschiedenen Leuten, die im engsten oder weitesten Sinn mit Raumakustik zu tun haben. Er beschreibt darin bestimmte Phänomene und rekonstruiert manche akustische Gegebenheit (z.B. die Funktion des griechischen Theaters).

Bei VITRUV findet er Aufzeichnungen über Tonvasen, die mit Wasser gefüllt und teilweise mit Löchern versehen, als Resonatoren dienten. Damit wurden einzelnen Frequenzen bzw. Frequenzbereiche bedämpft, um die Sprachverständlichkeit zu verbessern. In antiken Theatern, so war zu lesen, fanden sich oft große Szenenrückwände mit zusätzlichen Reflexionsflächen, so dass der Schall ins Auditorium zurückgeworfen werden konnte.
Noch einige andere Faktoren waren für die gute Akustik verantwortlich, letztendlich aber ist eine Sprech- oder Musikdarbietung im Freien problematischer als in geschlossenen Räumen. Dass die antiken Zuhörer trotzdem etwas von den Theateraufführungen mitbekamen, lag an dem Umstand, dass diese Theater eher außerhalb der belebten Siedlungsgebiete lagen. Professor Reichardt, vergleicht

dieses Phänomen der ruhigen Umgebung mit Bergsteigern, die im Schneefeld oft über eine größere Distanz die normale Unterhaltung anderer Bergsteiger mühelos verstehen, obwohl der Schnee schalldämpfend wirkt.

Das Gespräch entwickelt sich hin zu den verschiedenen Bauarten der geschlossenen Theater bis hin zum barocken Rangtheater. Dieser Teil soll den Punkt darstellen, an dem der Übergang zum Studienobjekt, einer Barockkirche, stattfindet.

Auch wenn die Pfarrkirche von Mariabrunn kein Barocktheater sondern eine Klosterkirche war, wurden eher gestalterische Aspekte berücksichtigt, während funktionelle Gesichtspunkte vielleicht weniger im Vordergrund standen. Im Fall der ehemaligen Klosterkirche kommt noch hinzu, dass sie mittlerweile als Pfarrkirche in einer anderen Art und Weise genutzt wird als zur Zeit der Erbauung.

Zu Beginn bzw. während der ersten Versuchsreihe kam von einem langjährigen aktiven Pfarrmitglied die Frage, „Warum die gute Akustik der Kirche untersucht werden soll und welche Ergebnisse erwartet werden? Die Erbauer werden doch gewusst haben, worauf zu achten sei.“ Der Einwand war durchaus berechtigt. Es stellte sich jedoch nach den ersten Messungen heraus, dass die Kirche für eine andere Nutzung als die gegenwärtige konzipiert wurde.

Ein Fall von gewünschter Konzeption und einem unerwarteten erfolgreiche Ergebnis quasi als Zugabe, sei in einer niedergeschriebenen Diskussion mit Professor Reichardt in den folgenden Absätzen zitiert (siehe [Rei79]).

Schriftlich festgehaltene nie geführte Diskussion mit Prof. Reichardt

[…]Frage: „Nun kann man die geschlossene Hülle um die Publikumsfläche ja sehr verschieden ausführen.“ […] „Stellt das barocke Rangtheater ein Optimum dar, und haben die damaligen Baumeister etwa Geheimnisse gehabt, oder haben sie gar

erfühlt, wie man akustisch optimal baut?“ „Zweifellos werden die Rangtheater der letzten Jahrhunderte doch als akustisch gut bezeichnet.“

Reichardt: „Ja, und das mit vollem Recht.“ „Die Gründe haben wir im Dresdner TU-Institut gefunden, nachdem wir ein Modell von der berühmten alten Dresdner SEMPER-Oper konstruiert und mit unseren modernen Methoden durch gemessen hatten“. […] „Von den Einzeleffekten, die wir heute messtechnisch belegen können, haben die alten Meister sicher nichts konkret gewusst“. […] „Was sie damals „erfühlt“ haben, ist natürlich heute schwer abzuschätzen.“ „Selbst, wenn ich voraussetze, dass es solche Institutionen (Prüflabors) gab, so glaube ich aber dennoch nicht, dass es ihnen gelungen wäre, diese gegen gesellschaftliche oder funktionelle Forderungen durchzusetzen“. […]
„Der Architekt durfte nur bei der gestalterischen Durcharbeitung einiges mitreden (und teilweise seinen eigenen Stil entwickeln), […] solange er im Zeichen der Zeit bleibt und dem gesellschaftlichen Status Ausdruck verleiht.“ „Beides, Funktion und Gestaltung, war bei Barocktheatern weitgehend vorgeschrieben.“ „Ins Theater ging man damals in erster Linie um gesehen zu werden, erst in zweiter, um etwas auf der Bühne mitzuerleben.“ „Musik war Begleitung.“ „Man unterhielt sich in Logen und unterbrach diese Unterhaltung erst, wenn berühmte Arien oder Sänger an die Reihe kamen“.

Exkurs:
Dazu sei in einem kurzen Exkurs auf ein musikalisches Detail verwiesen, das heute eher unverständlich erscheinen mag. Wenn man das von Reichardt erwähnte barocke Verständnis für einen Theaterbesuch vor Augen hat, ist die Reaktion eines Komponisten durchaus verständlich.
„Die Symphonie mit dem Paukenschlag“ von Joseph Haydn war so eine Reaktion darauf. Haydn wollte mit diesem Paukenschlag die Aufmerksamkeit des Publikums auf die (Hintergrund-)Musik lenken. Ein Verhalten, das heutzutage bei uns eher für ein Schmunzeln sorgt. Bei den damaligen Theaterbesuchern sorgte es fast für Empörung.
Ende des Exkurses:

Reichardt: „Wir wissen heute, dass die Rangbrüstungen und ihre Gestaltung ein hervorragendes Element für die gute Akustik bilden.“ „Dass sie überhaupt da waren, hatte keinen akustischen Grund.“
„Wäre es damals höfische Sitte gewesen, dass Brüstungen aus Gitterwerk zu bestehen haben, damit man die dahinter erscheinenden Persönlichkeiten nicht nur am Oberkörper, sondern bis zur Schuhsohle betrachten könne, so hätte der Akustiker (wenn es einen gegeben hätte) zusammen mit dem Architekten, messtechnisch untermauert, ganz eindringlich vortragen mögen, dass geschlossene Rangbrüstungen eine übergeordnet wichtige Funktion haben.“
„Man hätte beiden höflich lächelnd bedeutet, dass das selbstverständlich gar nicht in Frage kommen kann.“:
„Die Musiker sollen gefälligst, wenn das nötig ist, etwas lauter spielen.“

„Erfreulicherweise gab es diese höfische Sitte nicht, aber dafür eine andere:
Alles, was in den Gesichtskreis kam, musste reich gegliedert und verziert sein. Das ergab – auch ohne Ränge, z.B. im Konzertsaal und in der Kirche – eine herrliche akustische Rückwirkung (ohne, dass man sich dessen bewusst war)“. […][Rei79]

Diese Entwicklung, mit der reichen Verzierung von Theater- und Konzertsälen, Kirchen und anderer Bauwerke hielt sich bis ins 19. Jahrhundert (z.B. auch beim so geschätzten Wiener Musikvereinssaal). Auch wenn sich die gesellschaftlichen Voraussetzungen ein wenig gewandelt hatten, so baute man bis dahin noch immer in der Struktur des höfischen Rangtheaters.

2.2 Untersuchtes Objekt

Bei dem untersuchten Objekt handelt es sich um eine barocke Kirche am westlichen Stadtrand von Wien. Ich selbst verbrachte dort einen großen Teil meiner Freizeit, sei es als Ministrant, Jugendlicher und später auch als Sänger und ehrenamtlicher Mitarbeiter.

Abb. 1: Außenansicht der Pfarr- und Wallfahrtskirche Mariabrunn, Wien 14 (Quelle: [Kir07])

Im Zuge der Arbeit wurde nur dieses Objekt studiert. Für die Auseinandersetzung mit der Ermittlung der Absorptionsfläche reicht die Einschränkung aus, da der Lösungsansatz im Vergleich Simulation – Messung zu suchen ist und nicht in der messtechnischen Betrachtung von möglichst vielen Objekten.

2.2.1 Geschichte des Bauwerks

Der Legende nach, wobei mehrere Legenden miteinander verknüpft wurden, ging die Witwe des hl. Stephans von Ungarn, Königin Gisela, in den Wäldern am Wienfluss im Jahr 1042 spazieren. Sie war krank und wollte sich erholen. Als sie durstig wurde, brachte man ihr Wasser aus einer Quelle, in der die Diener auch eine Marienstatue sahen. Die Königin wurde gesund und ließ eine Kapelle errichten, in der die Statue aufgestellt wurde (siehe Abb. 2 – erstes Bild). Die Kapelle wurde durch die zahlreichen Überschwemmungen des Wienflusses bald wieder zerstört und die Statue wurde in die Pfarrkirche Weidlingau übertragen. Im Zuge einer Belagerung von Wien durch Mathias Corvinus um 1467 wurde die Statue erneut in einen Brunnen (zufällig der, in dem sie gefunden wurde) geworfen. Erst im Zuge der Befreiung Wiens durch den späteren Kaiser Maximilian I. wurde die Figur wiederum aufgefunden (siehe Abb. 2 – zweites Bild).

Abb. 2: Ursprungsbilder in der Pfarrkirche Mariabrunn – aus der Legende (Quelle: eig. Aufnahme)

In der Gegend, des heutigen Hadersdorf-Weidlingau gab es eine Pfarrkirche in Weidlingau, die 1356 erstmals urkundlich erwähnt wird. In Mariabrunn selbst gab es, abgesehen von der Wallfahrtskapelle (roter Kreis), keine Pfarrkirche. In den Wirren der Reformationszeit und der ersten Türkenbelagerung wurde die Pfarrkirche Weidlingau (gelber Kreis) zerstört und das Gebiet wurde ab dann seelsorglich von Hütteldorf (grüner Kreis) aus mitbetreut (siehe Abb. 3 - Ortsangaben aus der Stadtkarte).

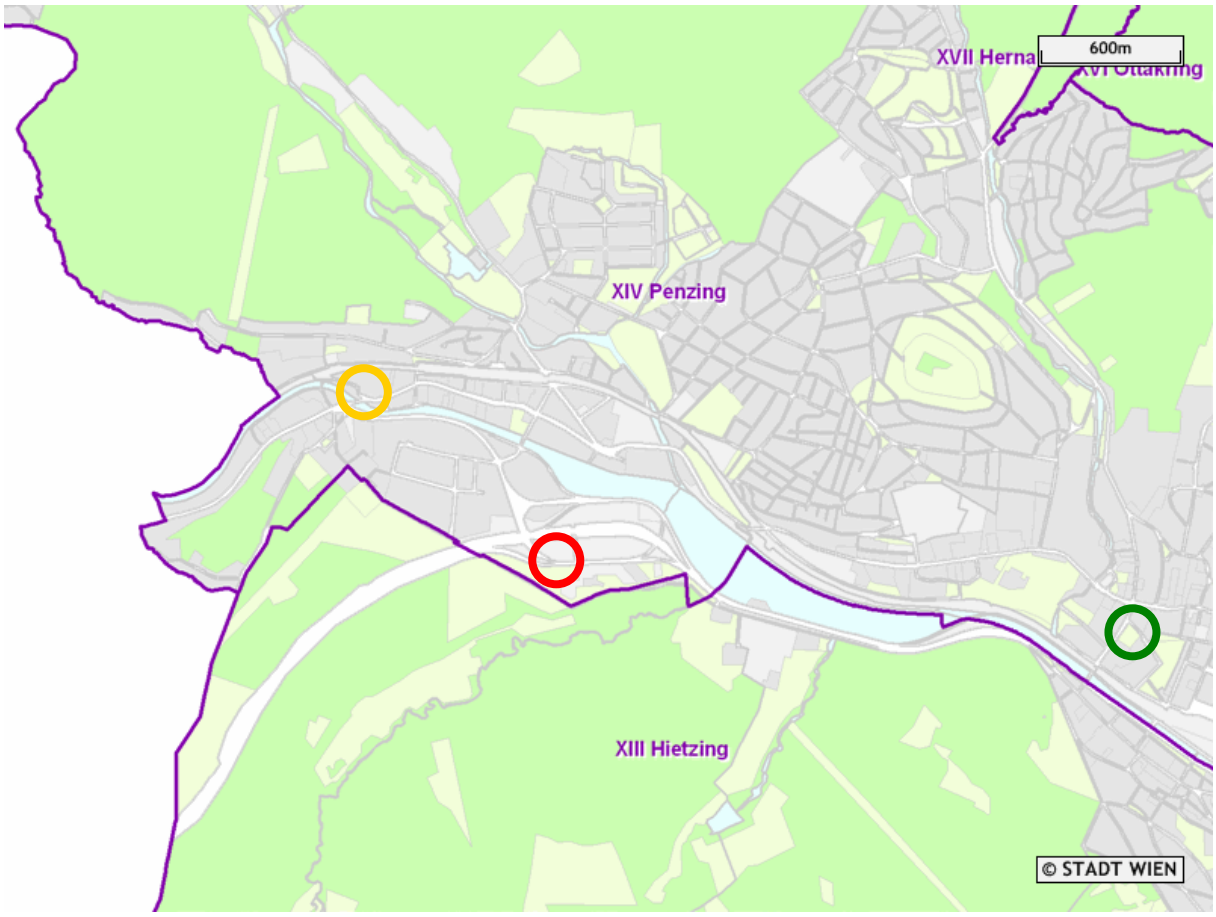


Abb. 3: Kirchenstandorte im 16. Jahrhundert in der aktuellen Stadtkarte (Quelle: http://www.wien.gv.at/stadtplan/spread.asp?lang=de; 30.12.09)

Im Laufe der Zeit gewann der Wallfahrtsort immer mehr an Bedeutung und so wurden im Jahr 1615 von Erzbischof Khlesl Wallfahrerprozessionen erlaubt.
Im Zuge der Gegenreformation wurden um 1630 von Kaiser Ferdinand II, der Orden der „unbeschuhten Augustiner“ aus Italien angesiedelt und es wurde ein Kloster abseits der Stadt errichtet (siehe Abb. 2 – drittes Bild). Zwischen 1639 und 1655 wurde die Kirche, wie sie sich über weite Teile in der heutigen Form präsentiert, errichtet, diente als Klosterkirche, war aber keine eigene Pfarrkirche. Durch die Reformen von Joseph II. wurde aus dem Gebiet rund um den Wallfahrtsort ein eigenes, von Hütteldorf abgetrenntes, Pfarrgebiet das mit den Ordenspriestern als Seelsorgern, bis zu deren Aussterben im Jahr 1829 besetzt wurde.
Ab dem Zeitpunkt wurden die Priester der Erzdiözese Wien für die pfarrliche Seelsorge eingesetzt und aus der Klosteranlage wurde die K u. K. forstliche Versuchsanstalt.

Die Kirche selbst, als sehr prächtige „Hofkirche“ ausgestattet, wurde vom Kaiserhaus nicht nur gegründet, sondern auch im Zuge von Jagdaufenthalten im Lainzer Tiergarten immer wieder besucht und gefördert.
Dieser Reichtum wird einerseits in den wertvollen Gegenständen, beispielsweise dem kunstvoll gestalteten Hochaltar, der Kanzel, sowie einzelnen Bildern sichtbar und andererseits in dem relativ bald nach der Fertigstellung der Kirche errichteten Schmiedeeisernen Gitter, als Schutz vor „Raub- und Diebesgesindel“, sichtbar.
Auch die Orgel wurde von einem in der Barockzeit bekannten Orgelbauer errichtet. [Kir07]

2.2.2 Nutzung

2.2.2.1 In der Vergangenheit

Um die Nutzung der Kirche und deren Hintergründe im Wandel der Zeit zu beschreiben, bedarf es wahrscheinlich einer eigenen wissenschaftlichen Arbeit. In den folgenden Absätzen werden überblicksartig manche Details beleuchtet, die mit der Raumakustik im Zusammenhang stehen bzw. stehen können.

Im Zuge des zweiten vatikanischen Konzils der katholischen Kirche gab es im Jahr 1969 eine Liturgiereform des Gottesdienstes. Bis dahin wurden Kirchen fast ausschließlich als Orte für die Feier der Heiligen Messe und Andachten verwendet. Erst in jüngerer Zeit wurde es üblich auch Konzertaufführungen in Kirchenräumen zu veranstalten, bis hin zu einer bewussten multifunktionalen Nutzung von Kirchen-neubauten als Gottesdienststätte und Veranstaltungsraum. So etwas ist, ohne eine entsprechende Auseinandersetzung mit der Raumakustik, unmöglich.

Das Verständnis der Liturgie wurde an die Erneuerungen aus dem Konzil angepasst und plötzlich wurde es wichtig, dass der Priester sowohl verstanden als auch gehört wurde. Der Gläubige war nicht mehr „nur Zuschauer“, sondern bis zur Ausübung von liturgischen Diensten, selbst am Geschehen beteiligt.

Bis zur Liturgiereform war es üblich, dass der Priester die heilige Messe „gelesen“ hat und die Gläubigen bewohnten. Da die Gebete nur in lateinischer Sprache gesprochen wurden, war es für einen Großteil der Leute nicht möglich zu antworten. Mindestens eine Person musste die Antworten sprechen und so war in jeder Messe ein Ministrant notwendig, der stellvertretend für die Gemeinde Antworten und Gebete sprach. Jeder Priester war damals verpflichtet, einmal am Tag eine Messe zu lesen. Musikalisch wurde die Messe meistens von der Orgel oder dem Chor begleitet, die eher als Untermalung fungierten.

Nur die Predigt und die Worte aus der heiligen Schrift waren in der Landessprache und sollten auch gehört werden. Zu dem Zweck wurden Kanzeln errichtet, die aus akustischen Gründen hoch über den Gläubigen errichtet wurden um die Predigten hörbar zu machen.

Abb. 4: Situation in der Kirche vor der Liturgiereform (Quelle: Wallfahrtsmuseum Mariabrunn)

In der Zeit nach der Erbauung wurde die Kirche als Klosterkirche genutzt. Sichtbar wurde diese Nutzung in einem, für die Größe und Bedeutung der Kirche relativ

großzügigen Altarraum (siehe Abb. 4), der viel Platz für die mitfeiernden Ordensleute bot.
Weiters sind relativ viele Seitenaltäre vorhanden, so dass jeder Ordenspriester (nicht alle Mönche waren auch Priester) seine Messe lesen konnte.

2.2.2.2 Im heutigen Gottesdienst

Die Verständlichkeit der Liturgie ist der Maßstab für die heutige Form des Gottesdienstes. Der Priester betet in der Landessprache und feiert am Volksaltar. Die Worte der heiligen Schrift, die in Schriftstellen zu je 3 verschiedenen „Lesejahren“ aufgeteilt sind, werden von Priester und Lektoren nicht mehr von der Kanzel, sondern von einem erhöhten Platz in der Kirche, dem Ambo, vorgetragen. Der Chor singt nicht mehr nur lateinische Messen, sondern verschiedene, zur jeweiligen Feier passenden Werke. (vgl. Abb. 5).

Abb. 5: Situation in der Kirche nach der Liturgiereform (Quelle: eig. Aufnahme)

Diese Anforderungen passen nicht mehr ganz zur ursprünglichen Konzeption des Bauwerks. Die Gläubigen mittlerweile wollen hören und sehen, was sich da vorne abspielt und mitfeiern, anstatt nur Zuschauer zu sein.

Um ihnen das zu ermöglichen wurde eine Mikrofonanlage eingebaut. Wird zu undeutlich bzw. zu leise oder zu schnell gesprochen, so gibt es entweder nichts oder nur Unbrauchbares zu verstärken.

Der Chor blieb weiterhin auf dem für ihn bestimmten Platz und wurde entweder als zu leise empfunden oder man hat sich über zu große Textundeutlichkeit beklagt. Daraufhin wurde die Chorsänger von der Orgelempore heruntergeholt und durften sich im Altarraum aufstellen. Bei Messen mit Chor und Orchester war dann der Altarraum so gut gefüllt, dass der Priester wenig Platz für die Messfeier hatte und auch wieder nicht alle den Text verstanden.

2.2.2.3 Für Konzerte

Wurden Kirchenkonzerte veranstaltet, so war das vorher beschriebene Platzproblem nicht mehr so schlimm. Im Vordergrund stand das aufgeführte Programm und der bauliche Rahmen rundet die Aufführung positiv ab. Von der „guten Akustik“ schwärmte niemand.
Hinzu kommt, dass die Kirche nicht beheizt werden kann, was den Zeitraum für Konzerte auf Ende Mai bis Ende Oktober einschränkt.
Ein weiteres Thema für Konzerte ist die Bestuhlung. Die barocken Kirchenbänke bieten nur für ca. 125 Leute Platz und sind eher Sitzgelegenheiten für Wallfahrergruppen.
Letztendlich ist die Kirche für heiligen Messen und Andachten konzipiert, während sich die Nutzung als Konzertsaal eher auf Benefizkonzerte beschränkt.

2.3 Akustische Grundlagen

2.3.1 Nachhallzeit

Die auffälligste akustische Eigenschaft eines Raumes ist seine „Halligkeit“ die sich über die Zeitdauer des Nachhalls charakterisieren lässt. Die Halligkeit bestimmt gleichzeitig auch zu einem überwiegenden Teil den akustischen Eindruck eines Raumes. Hier untermauert die Nachhallzeit den subjektiven Eindruck der Räumlichkeiten. Ist sie kurz, wird der Raum als „trocken“ oder für Musikschaffende als „nicht tragend“ empfunden. Ist sie zu lang, so kann die daraus entstehende

„Weite“, rasch zur „Unendlichkeit“ bzw. zum „Klangbrei“ und für Musiker oder Sprecher zum Problem werden.

Lange Zeit war das die einzige Ziel- und Planungsgröße. Auch heute noch wird die Nachhallzeit als ein sehr wichtiges Kriterium herangezogen. Je nach Art und Form der Darbietung (z.B. Sprechtheater, Fachvortrag, Opernaufführung, Orgelmusik, Kammermusik, usw.), aber auch der Größe des Raumes, gibt es unterschiedliche Anforderungen an die optimale mittlere Nachhallzeit.

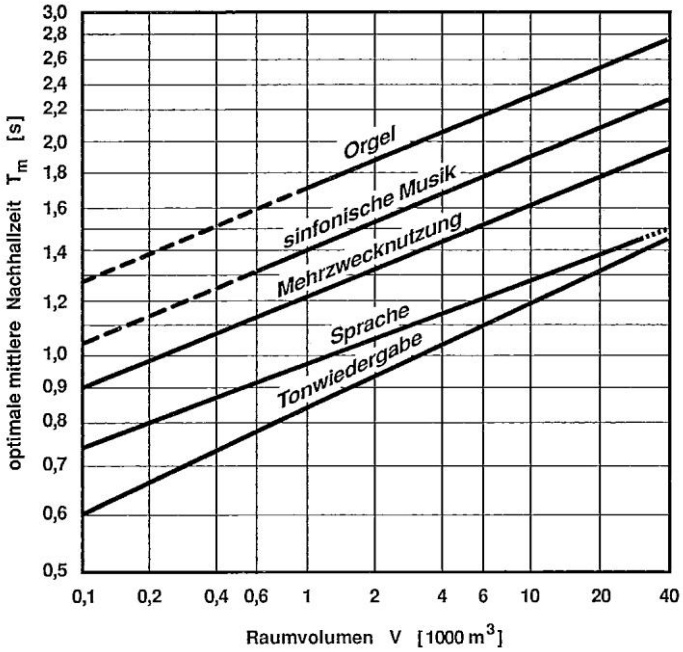


Abb. 6: Zusammenhang zwischen Raumvolumen Und Nachhallzeit (Quelle: [Fas03])

Die Näherungswerte für Musik (sinfonische Musik) liegen bei 2 s und für Sprache bei 1 s. Werden Räumlichkeiten für verschiedenartige Darbietungen genutzt, so wird die Planungsgröße für die Hauptnutzung gewählt. Räumlichkeiten, die zur Nutzung mit Beschallungsanlagen geplant werden, benötigen eher niedrige Nachhallzeiten, da der Raumeindruck auf elektroakustischem Wege erzeugt wird.

Da die Nachhallzeit für alle Punkte im Raum gleich ist, braucht man für die akustisch unterschiedlich bewerteten Zuhörerbereiche noch zusätzliche Gütemerkmale.
Die Nachhallzeit T (oder auch Reverberation Time, RT) ist jene Zeitspanne, in der der Schalldruckpegel nach Beendigung der Schallabstrahlung um 60 dB abgenommen hat.

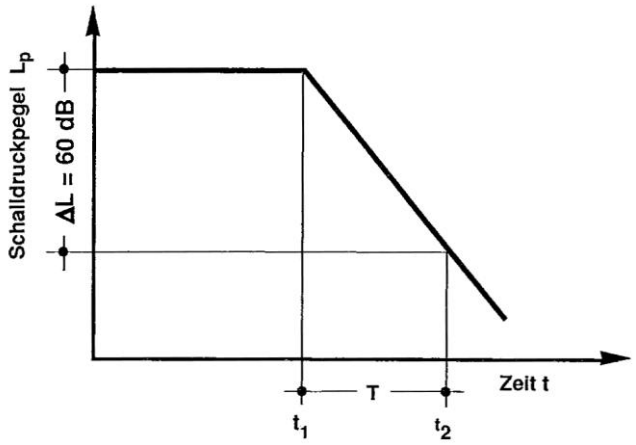


Abb. 7: Definition der Nachhallzeit als Pegelabfall (Quelle: [Fas03])

2.3.1.1 Hinführung

Definition Schall

Schall wird als mechanische Schwingung in elastischen Medien, wobei diese fest, flüssig oder gasförmig sein können, bezeichnet. Diese mechanischen Schwingungen, die durch äußere Krafteinwirkung hervorgerufen werden, bewegen Teilchen um ihre Ruhelage. Die Geschwindigkeit der in sich bewegenden Teilchen wird Schallschnelle v genannt. Nicht verwechselt darf diese Größe mit der Schallgeschwindigkeit c werden, die die Ausbreitung der Schallwellen angibt.

Die Schallgeschwindigkeit (auch Phasengeschwindigkeit) ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle. Abhängig ist dieser Wert von Art und Zustand des Mediums. In Luft breitet sich der Schall mit c_0 = 343 m/s (bei 20°C) aus. Für andere Temperaturen lässt sich die Schallgeschwindigkeit näherungsweise mit

$$c_0 = 331 + 0{,}6t \quad m/s$$

mit

t *Temperatur in* $[°C]$

berechnen.

In der Raumakustik sind Schallvorgänge, die über das menschliche Ohr wahrgenommen werden können, im Medium Luft interessant. Hörbar ist der Schall (Hörschall), wenn Frequenz (Tonhöhe) und Druck (Amplitude) der Schwingungen

vom menschlichen Ohr wahrgenommen werden kann. Diese beiden Parameter sind die wichtigsten Kennzeichen von Schallschwingungen.

Frequenzen

Ein Ton ist eine Schallschwingung in Form einer reinen Sinuswelle. In der Praxis kommen diese reinen Schwingungen eher selten vor. Meist setzen sich verschiedene Teilfrequenzen und –amplituden zu einem Tongemisch bzw. Geräusch zusammen.

Unter der Frequenz versteht man die Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit. Die Einheit der Frequenz ist Hertz (1/s = Hz) und gibt die Tonhöhe an. Die Zeiteinheit in der sich eine Schwingung periodisch wiederholt ist die Periodendauer, die zur Frequenz umgekehrt proportional ist (siehe Abb. 9).

$$f = \frac{1}{s}\ in\ [Hz]$$

$$T = \frac{1}{f}\ in\ [\mathrm{sec}]$$

Das menschliche Gehör kann einen Frequenzbereich von 16 Hz bis 20.000 Hz wahrnehmen, wobei die obere Grenze z.B. altersbedingt auch geringer sein kann. Das folgende Bild (siehe Abb. 8) zeigt eine Übersicht der verschiedenen Frequenzbereiche und die Teilbereiche der Akustik, die sich mit ihnen auseinandersetzen.

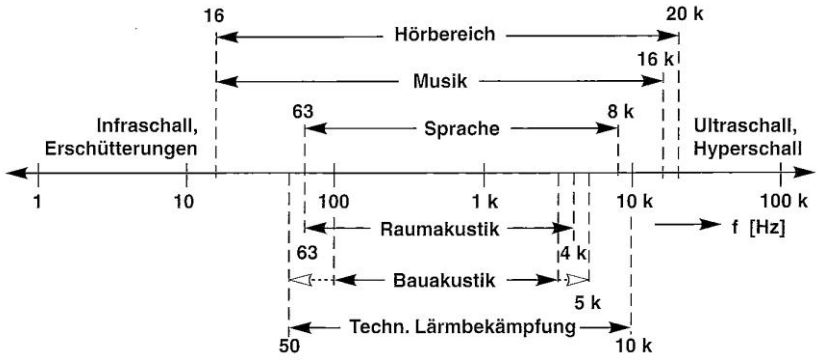


Abb. 8: Wichtige Frequenzbereiche der Akustik (Quelle: [Fas03])

Um die Frequenzen, zuordnen zu können, wurden sie, wie in der Musik üblich, in Intervallen, z.B. in Terzen und Oktaven, zugeordnet. Eine Verdoppelung bzw. Halbierung von zwei Frequenzen entspricht einer Oktav (Frequenzverhältnis 1:2).

Eine noch feinere Abstufung der Frequenzen erfolgt in Terzen, einem Drittel einer Oktav (Frequenzverhältnis 1:1,28).

Um bei Schallmessungen (oder Simulationen) das Schallspektrum zuordnen zu können, verwendet man Oktav- bzw. Terzfilter, die den Schall in Bereiche unterteilen. Damit man überall gleiche Band-Mittenfrequenzen erhält, werden standardisierte Vorzugsfrequenzen, ausgehend von 1000 Hz, verwendet (siehe Tab. 1).

Tab. 1: Normierte Band-Mittenfrequenz f_m - auszugsweise (Quelle: [Fas03])

n	Norm-Frequenz f_m [Hz]		n	Norm-Frequenz f_m [Hz]		n	Norm-Frequenz f_m [Hz]	
	Terz	Oktave		Terz	Oktave		Terz	Oktave
12	16	*	22	160		32	1600	
13	20		23	200		33	2000	*
14	25		24	250	*	34	2500	
15	31,5	*	25	315		35	3150	
16	40		26	400		36	4000	*
17	50		27	500	*	37	5000	
18	63	*	28	630		38	6300	
19	80		29	800		39	8000	*
20	100		30	1000	*	40	10000	
21	125	*	31	1250		41	12500	

Anmerkung: Die Zahl n ist jeweils diejenige positive natürliche Zahl, mit der sich die Terzband-Mittenfrequenz aus dem folgenden Zusammenhang exakt errechnen läßt:

$$f_m = 10^{n/10} \quad [\text{Hz}]$$

Wellenlänge

Als Wellenlänge wird der Abstand zwischen zwei Punkten des gleichen Schwingungszustandes bezeichnet (siehe Abb. 9). Aus dem folgenden Zusammenhang:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \; in \; [m]$$

ist ersichtlich, dass Periodendauer T bzw. Frequenz f mit der Schallgeschwindigkeit c verknüpft, die Wellenlänge λ ergeben.

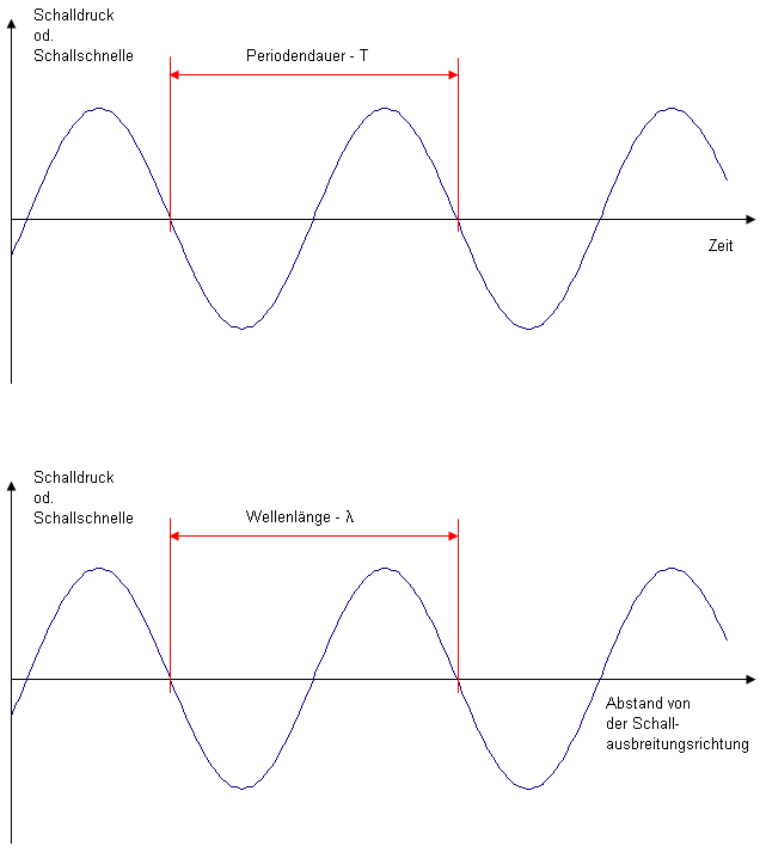


Abb. 9: Periodendauer und Wellenlänge einer Schwingung (Quelle: eig. Darstellung)

Um sich die Größenordnungen der Wellenlänge, bei Schallausbreitung in Luft (mit c_0 ≈ 343 m/s), vorstellen zu können, sei auf drei Beispiele verwiesen:

100 Hz λ = 3,4 m

1000 Hz λ = 0,34 m = 34 cm

10 000 Hz λ = 0,034 m = 34 mm

Bei der Schallausbreitung in Räumen machen sich die unterschiedlichen Wellenlängen in der Raumgeometrie, inkl. Einbauten und Oberflächen durch Reflexionen, Absorptionen, usw. bemerkbar.

Schalldruckpegel

Um mit dem zweiten Charakterisierungskriterium für Schallschwingungen sinnvoll umgehen zu können, wurden Schalldruckpegel L_p definiert. Da der Schalldruck, eigentlich ein Wechseldruck, in einer Größenordnung von 20 μPa (Hörschwelle) bis

zu 20 Pa (Schmerzgrenze) vorkommt und im Vergleich zum atmosphärischen Druck (Größenordnung von ca. 100 000 Pa) eher gering ist, wurde der Schalldruckpegel als Vergleichswert definiert.
Da das menschliche Ohr sich nicht an absoluten, sondern an relativen Schalldruckänderungen orientiert (ca. 10% Schalldruckänderung können wahrgenommen werden), ist es in der Akustik üblich, mit daraus abgeleiteten logarithmischen Größen zu arbeiten.

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \; in \; [dB]$$

mit

$p_0 ... Bezugswert \; des \; Schalldruckes: \; p_0 = 20 \mu Pa$

Schalldruckpegel werden in Dezibel [dB] angegeben. Mit entsprechenden Bezugswerten liegen die Schalldruckpegel des Hörbereichs zwischen 0 dB (Hörschwelle) und 130 dB (Schmerzgrenze). Eine wahrnehmbare Größenordnung sind Schalldruckpegeländerungen von ca. 1 dB.

Um mit Schalldruckpegeln rechnen zu können, sind die Rechenregeln für Logarithmen einzuhalten.
Für die Addition von n verschiedenen (unterschiedlichen) Pegeln L_j gilt:

$$L_{ges} = 10 \log \sum_{j=1}^{n} 10^{\frac{L_j}{10}} \; in \; [dB]$$

Um n gleiche Schallpegel L_i zu addieren gilt:

$$L_{ges} = L_i + 10 \log n \; in \; [dB]$$

Schallempfindung

Innerhalb des hörbaren Schallbereichs (von 16 bis 20 000 Hz) ist die Empfindlichkeit des Gehörs von der Frequenz abhängig. Im folgenden Bild (siehe Abb. 10) sind Kurven gleicher Lautstärke, über den gesamten Frequenzbereich aufgetragen, zu sehen. Diese Kurven entstanden aus Versuchen, wo „normalhörenden“ Testpersonen Sinustöne, aus einer frontal auf die Testperson einfallenden

Schallwelle, vorgespielt wurden. Dabei wurde der Schalldruckpegel über alle untersuchten Frequenzen variiert, so dass der Eindruck der Lautstärke bei den Testpersonen im Mittel gleich war.
Diese subjektiv stark schwankende Vergleichsgröße wird als Lautstärkenpegel L_N mit der Einheit [phon] bezeichnet.

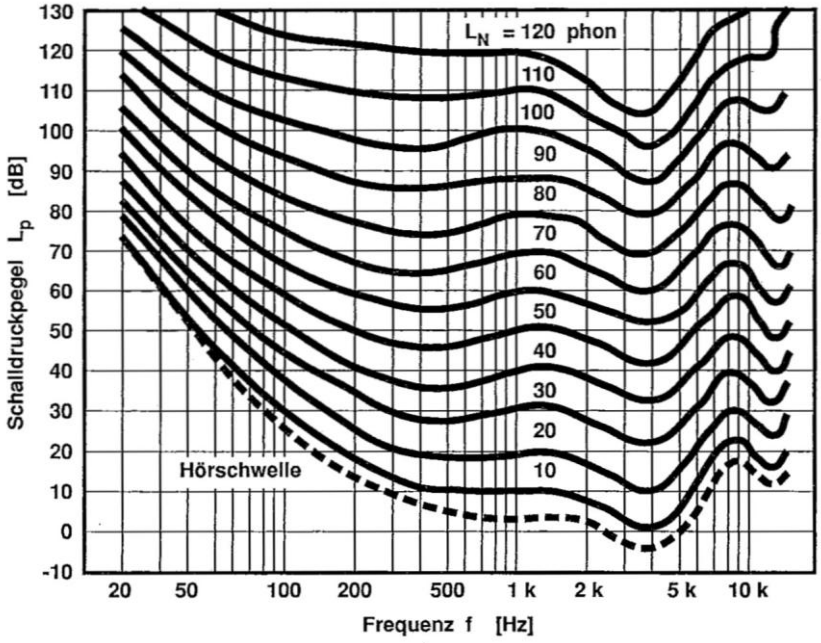


Abb. 10: Kurven gleicher Lautstärkepegel L_N für Sinustöne im freien Schallfeld (Quelle: [Fas03])

Die Kurven zeigen, dass das menschliche Gehör bei niedrigen Lautstärkepegeln sehr empfindlich auf unterschiedliche Frequenzen reagiert. Sichtbar wird das im gleich bleibenden Lautstärkepegel und den teilweise große Differenzen zwischen den Schalldruckpegeln bei unterschiedlichen Frequenzen.
Bei hohen Lautstärkepegeln werden die unterschiedlichen Frequenzen eher weniger wahrgenommen werden.

Um in der Praxis das frequenzabhängige Hörverhaltens des Ohres nachbilden zu können, wurden 3 Bereiche ausgewählt und aus den entsprechenden Kurven gleicher Lautstärkepegeln (siehe Abb. 10), 3 Kurven ausgewählt und angenähert. Wenn man diese Kurven (siehe Abb. 11), die bereits die Schalldruckpegelkorrektur zeigen, genauer betrachtet, sieht man,dass sie im Prinzip die umgedrehten, angenäherten Kurven gleicher Lautstärkepegel darstellen (vgl. Abb. 10 und Abb. 11)

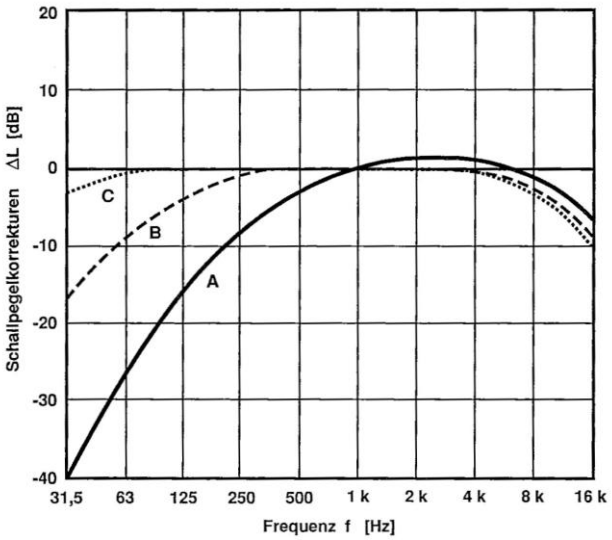


Abb. 11: Frequenzbewertungskurven A, B und C (Quelle: [Fas03])

Um niedrige Lautstärkepegel abzubilden, wurde die Kurve A ($L_N \approx 40$ phon), für Mittlere die Kurve B ($L_N \approx 80$ phon) und die Kurve C für hohe Lautstärkepegel ($L_N \approx 100$ phon), erstellt. Die in der obigen Kurve gezeigten Korrekturwerte sind zur Absenkung (bzw. Erhöhung) der entsprechenden Bandmittenfrequenzwerte gedacht und sollen die Frequenzabhängigkeit des menschlichen Ohres abbilden.
Diese Bewertungskurven (bzw. die Korrekturwerte) sind auch in Schallpegelmessern eingebaut und liefern bei entsprechender Summenpegelbildung den Gesamtschalldruckpegel in [dB(A], [dB(B)] oder [dB(C)] für Einzahlangaben bei Messungen zur Lärmbekämpfung.

Zeiteinwirkung

Da das menschliche Gehör eine gewisse Trägheit bei der Wahrnehmung von Schallereignissen besitzt, muss bei Schallereignissen die Einwirk- bzw. Einschwingzeit berücksichtigt werden. Der tatsächliche Schalldruckpegel kann erst nach einer gewissen Zeit in voller Größenordnung wahrgenommen werden. Als Zeitkonstante für den Einschwingvorgang werden im Mittel 35 ms angesetzt. Interessant ist diese Tatsache bei der Messung von Schalldruckpegeln, besonders bei kurzen Schallimpulsen. Analog zur Bewertung des Schallempfindens kann auch der Faktor Zeit (Impuls, fast, slow) mit entsprechenden Zeitkonstanten bewertet werden, da bei Schallimpulsen die gemessenen Werte sonst zu niedrig wären.

Bei der Messung und Bewertung von zeitlich begrenzten, jedoch länger einwirkenden Geräuschen, geht man dazu über, den Schalldruckpegel eines Dauergeräusches zu suchen, der in der Wirkung äquivalent ist. Entscheidend ist hier der Äquivalenzparameter, der zugrunde gelegt werden kann. Bei subjektiven Untersuchungen der Störwirkungen von Geräuschen wurde ein mittlerer Äquivalenzparameter von q = 3 dB gefunden, mit dem sich ein äquivalenter Dauerschallpegel L_{eq} in [dB] berechnen lässt:

$$L_{eq} = 10 \log \sum_{j=1}^{k} \frac{t_j}{T} 10^{\frac{L_{p,j}}{10}} \; in \; [dB]$$

oder

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L_p(t)}{10}} dt \; in \; [dB]$$

mit

T.....*Gesamtzeit, oder Mittelungszeit in* [sec]

t_j.....*Zeiträume in* [sec], *in denen jeweils die Schalldruckpegel* $L_{p,j}$ *vorhanden* sin d

$L_p(t)$.....*zeitabhängiger Schalldruckpegel in* [dB]

In der Raumakustik, im Hinblick auf die Wahrnehmbarkeit des Gehörs von Sprache und Musik, ist eher das Ausschwingverhalten bzw. die Reaktion auf aufeinander folgende Schallsignale interessant. Wenn eine Geräuscheinwirkung plötzlich abgeschaltet wird, so nimmt der Lautstärkepegel (fast unabhängig von der Frequenz) um ca. 9 phon pro 50 ms ab. Das würde einer Nachhallzeit von ca. 0,35 sec entsprechen. Kurzzeitig aufeinander folgende Geräusche in einem entsprechend niedrigen Frequenzbereich, mit einem zeitlichen Abstand kleiner als 5 bis 10 ms, können aufgrund der Verdeckungswirkung nicht mehr unterschieden werden. Sind die Abklingvorgänge entsprechend länger (wie beim Nachhall in Räumen), so können diese Verdeckungserscheinungen stärker auftreten.

Bei gleichartigen Geräuschen, die z.B. im Direktschall und zeitlich versetzt als Reflexion auftreten, gibt es einen Zeitpunkt (Verwischungsschwelle), der als störend empfunden wird. Bei Sprache ist dieser Zeitpunkt eine Grenze für die Laufzeitdifferenz zwischen Direktschall und Reflexion. Zusätzlich ist für die Verständlichkeit auch die Sprechgeschwindigkeit relevant. In der Praxis liegen die Werte für die Verwischungsschwelle zwischen 30 und 100 ms, wobei als

Planungsgröße ein Mittelwert von 50 ms angesetzt wird. Dieser Wert soll die Grenze zwischen nützlichen und störenden Reflexionen darstellen und spielt bei der Ermittlung der Deutlichkeit (siehe Kap. 2.3.2.1 Deutlichkeit) eine Rolle.
Bei Musik ist die Verwischungsschwelle als Grenze für störende Reflexionen weniger stark ausgeprägt. Hier spielt eher die Grenze zwischen Reflexionen eine Rolle, durch die Klarheit und Durchsichtigkeit der Musik gefördert werden sollen (siehe Kap.2.3.2.2 Klarheitsmaß). Als Planungsgröße werden hier 80 ms angesetzt.
Zur Erhöhung des Raumeindrucks tragen seitliche Reflexionen, die schon nach kurzen Zeitabständen (ca. 25 ms) zum Direktschall einfallen, bei.

Wird der zeitliche Abstand zwischen Direktschall und Reflexionen, größer als die Verwischungsschwelle, so wird die Reflexion als getrenntes Schallereignis wahrgenommen. Man spricht dabei vom Echo, das eher störend wirkt und in der raumakustischen Planung vermieden werden muss.
Bei Sprache wird vereinfachend mit einer Echogrenze von 100 ms gerechnet.

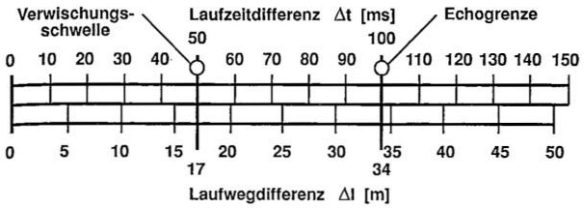


Abb. 12: Laufzeit- und Laufwegdifferenz (Quelle: [Fas03])

Im Bild (Abb. 12) sind die beschriebenen Grenzen mit der dazugehörigen Laufwegdifferenz (für die Schallausbreitung in Luft mit c ≈ 340 m/s) angegeben und können als geometrische Planungsgröße zur Vermeidung von störenden Reflexionen verwendet werden.

Schallleistung

Der Schalldruckpegel ist eine ortsabhängige Größe. Bei ungestörter Schallausbreitung nimmt der Schalldruck mit der Entfernung ab. Will man Schallquellen ortsunabhängig beschreiben, so kann die abgestrahlte Schallleistung W in [W], oder der Schallleistungspegel L_w in [dB] ermittelt werden.

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \; in \; [dB]$$

mit

$W_0 = p_0 v_0 1m^2 = 1pW$ *.....Bezugswert der Schallleistung*

$p_0 = 20 \; \mu Pa$ *.....Bezugswert des Schalldruckes*

$c_0 \approx 343 \; m/s$ *.....Schallgeschwindigkeit in Luft* (*bei* $20\,°C$)

$\rho_0 \approx 1{,}25 \; kg/m^3$ *.....Dichte der Luft* (*bei* $20\,°C$)

$$v_0 = \frac{p_0}{\rho_0 c_0} = 50\,nm/s \text{.....Bezugswert der Schnelle}$$

Um eine Größenordnung für die Schallleistung bzw. den Schallleistungspegel zu bekommen sei auf Abb. 13 verwiesen. Die Schallleistung eines Sängers oder Sprechers kann z.B. zur Entscheidung über die Notwendigkeit einer Beschallungsanlage herangezogen werden.

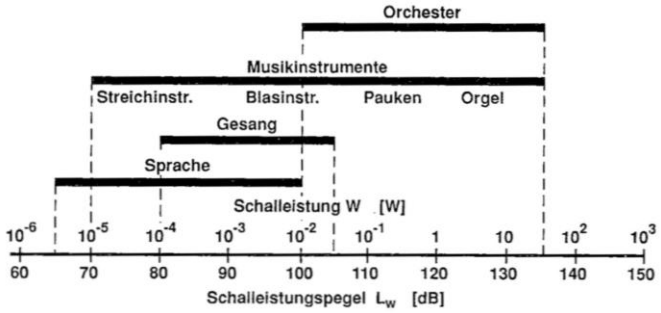


Abb. 13: Schallleistungs- und Schallleistungspegelbereiche von Sprache, Gesang und Musik (Quelle: [Fas03])

Schallausbreitung in Räumen

Im Gegensatz zur Schallausbreitung im Freien ist die Schallausbreitung in Räumen weitgehend ortsunabhängig. Ausgenommen ist der Bereich in einem bestimmten Abstand zur Schallquelle, dem direkte Schallfeld. Die Ursache dafür sind die Reflexionen des Schalls beim Auftreffen auf die raumbegrenzenden Flächen und Einbauten. Diese Reflexionen wiederholen sich durch neuerliches Reflektieren des bereits reflektierten Schalls. Es entsteht ein diffuses Schallfeld, das sich mit dem Direktschallfeld in der Nähe der Schallquelle überlagert. Die Größe des direkten Schallfeldes im diffusen Schallfeld wird näherungsweise durch den Hallradius r_H bestimmt.

$$r_H = \sqrt{\frac{A}{50}} \approx 0{,}14\sqrt{A}\ in\ [m]$$

Die Höhe des Schalldruckpegels im diffusen Schallfeld ist vom Umfang der auftretenden Reflexionen, sowie von der Geschwindigkeit, mit der die abgestrahlte Schallleistung absorbiert wird, abhängig.

Absorption und Reflexion

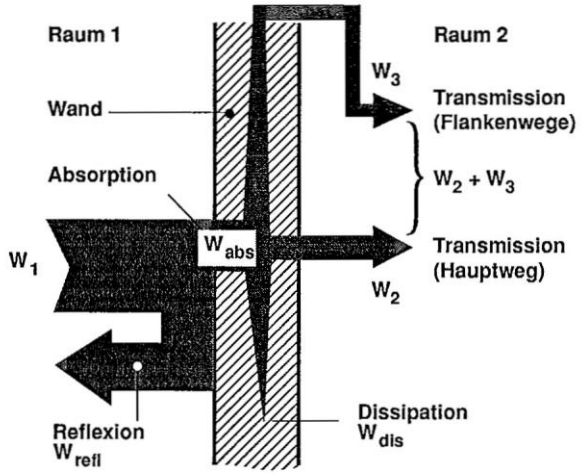


Abb. 14: Prinzipdarstellung zu Absorption, Reflexion und Transmission bei Schalleinfall auf eine Wand (Quelle: [Fas03])

Wird in einem Raum eine Schallquelle mit der Schalleistung W_1 aufgestellt, so wird ein Teil der auftreffenden Schallleistung reflektiert W_{refl}. Aus dem Verhältnis kann man den Schallreflexionsgrad ρ bestimmen.

$$\rho = \frac{W_{refl.}}{W_1}$$

$\rho = 1 ....vollständige\ \mathrm{Re}\ flexion$

$\rho = 0 ....vollständige\ Absorption$

Ein anderer Teil der auftreffenden Schallleistung wird im Raum absorbiert W_{abs}. Aus dem Verhältnis zwischen gesendeter und absorbierter Leistung wird der Schallabsorptionsgrad α berechnet.

$$\alpha = \frac{W_{abs.}}{W_1}$$

$\alpha = 1 ....vollständige\ \ Absorption$

$\alpha = 0 ....vollständige\ \ Reflexion$

Da die gesamte Schallleistung niemals ausschließlich reflektiert bzw. absorbiert wird, ergibt sich der Zusammenhang $\rho + \alpha = 1$.

Wie im obigen Bild (siehe Abb. 14) sichtbar, gibt es zusätzlich zur Reflexion und Absorption noch Schallübertragungen in Nachbarräume (Transmission) bzw. ins Freie (τ bzw. τ'). Ebenfalls berücksichtigt werden muss die Umwandlung der Schallteilchen in Wärme (Dissipation), bei porösen, offenporigen Stoffen (W_{diss}).

$$\tau = \frac{W_2}{W_1}$$

bzw.

$$\tau' = \frac{W_2 + W_3}{W_1}$$

mit

$W_2 .....(direkter\ Übertragungsweg)$

$W_2 + W_3 .....(Haupt - und\ \ Flankenwege)$

Somit ergibt sich der Schallabsorptionsgrad einer Fläche mit:

$$\alpha = \frac{W_{abs}}{W_1} = \frac{W_{diss} + W_2 + W_3}{W_1} = \frac{W_{diss}}{W_1} + \tau'$$

Für die folgenden Überlegungen wird die Schall- -transmission und –dissipation vernachlässigt.

Analog zur Frequenzabhängigkeit des Schallempfindens (gleicher Lautstärkepegel mit unterschiedlichen Schalldruckpegeln bei verschiedenen Frequenzen) soll auch die Frequenzabhängigkeit bei der Schallabsorption (Schallabsorptionsgrad α) berücksichtigt werden (jede Oberfläche reagiert auf die verschiedenen Frequenzen unterschiedlich).

Äquivalente Schallabsorptionsfläche

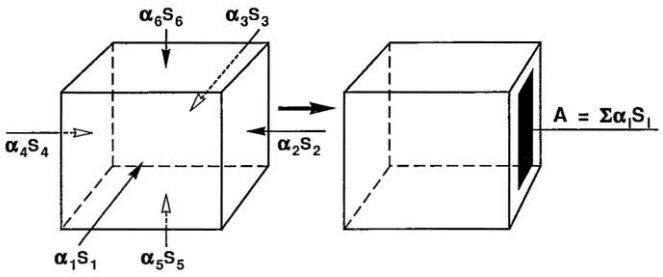


Abb. 15: Zur Definition der äquivalenten Schallabsorptionsfläche A eines Raumes (Quelle: [Fas03])

Wird einer geometrischen Fläche S ein Absorptionsgrad α zugewiesen, so erhält man eine frequenzabhängige Modellfläche A (auch äquivalente Schallabsorptionsfläche genannt):

$$A = \alpha S \ in \ [m^2]$$

wobei α=1 (vollständige Absorption) ist. Damit lässt sich auch die Absorptionswirkung von Menschen und Gegenständen in einem Raum, sowie der Luftabsorption in großen Räumen beschreiben.

Fasst man mehrere Teilflächen S_i sowie die zugehörigen Schallabsorptionsgrade α_i (siehe Abb. 15) zusammen

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + ... = \sum \alpha_i S_i \ \ in \ [m^2]$$

so kann man die Schallabsorptionsfläche A eines Raumes bestimmen. Im Bild (Abb. 15) wird ein akustisch gleichwertiger Modellraum gezeigt, der sämtliche Absorptionseigenschaften auf eine Fläche konzentriert. Dadurch lässt sich z.B. die Nachhallzeit für einen Raum nach Sabine´ berechnen.

Messtechnische Bestimmung der Schallabsorptionseigenschaften

Am häufigsten zum Einsatz bei der Bestimmung der Schallabsorptionseigenschaften kommt das sog. „Hallraumverfahren“. Genutzt wird die Tatsache, dass das Einbringen von absorbierenden Gegenständen, die äquivalente Schallabsorptionsfläche erhöht. Die absorbierende Wirkung des zu prüfenden Gegenstandes wird erhöht, je weniger der Raum selbst absorbiert, wodurch Räume

mit möglichst gut reflektierenden, schlecht absorbierenden Begrenzungsflächen (einem Hallraum) zum Einsatz kommen.

Bestimmt wird die Nachhallzeit mit und ohne zu prüfende Gegenstände. Aufgrund des Zusammenhanges der Sabine´ schen Nachhallzeitdefinition zwischen Raumvolumen, Nachhallzeit und äquivalenter Absorptionsfläche kann von der Nachhallzeit auf die äquivalente Absorptionsfläche geschlossen werden. Um das frequenzabhängige Verhalten der geprüften Materialien feststellen und bewerten zu können, werden die Schallabsorptionsgrade aus den Terzband-Mittenfrequenzabhängigen Nachhallzeiten bestimmt. Ergeben die Messungen Schallabsorptionsgrade von $\alpha>1$ (aufgrund von Beugungserscheinungen), so wird in der praktischen Anwendung mit $\alpha=1$ gerechnet.

Um eine entsprechende Messgüte zu erhalten, benötigen Prüfobjekt (ca. 10 – 12 m^2 Prüffläche) und Hallraum (ca. 200 m^3) eine entsprechende Mindestgröße, die in den entsprechenden Normen geregelt sind.

Reflexion und Streuung

Das Verhältnis zwischen Schallwellenlänge und Strukturbreite bzw. –länge der Reflexionsfläche bestimmt maßgeblich den Reflexionsvorgang. Auch die Reflexionswirkung ist (analog zur Schallabsorption) frequenzabhängig, da die Reflexionswirkung der Fläche von der Wellenlänge abhängig ist.

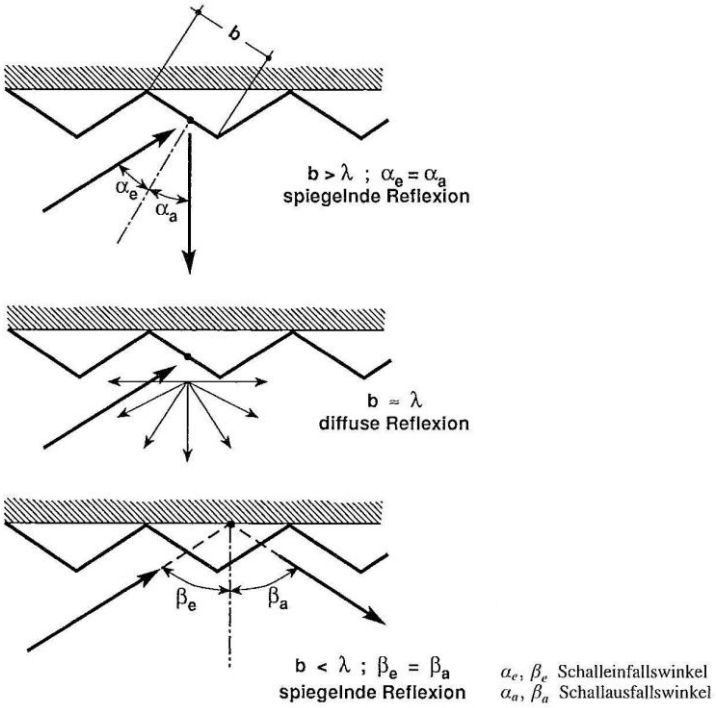


Abb. 16: Reflexionswirkungen einer Fläche mit Strukturen der Breite b in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ (Quelle: [Fas03])

In Bild (Abb. 16) sind verschiedene Formen der Reflexionen dargestellt. Um eine Vorstellung der Größenordnungen zu bekommen wird für die Strukturbreite bzw. –länge ein konkreter Wert (von b = 20 cm) eingesetzt. Die Schallgeschwindigkeit wird mit c_0=340 m/s angenommen.

Ist die Reflexionsfläche im Vergleich größer als die Wellenlänge, so erfolgt die Schallreflexion analog zur Optik (Einfallswinkel ist gleich Ausfallswinkel). Man spricht von geometrisch gerichteten oder spiegelnden Reflexionen.
Im konkreten Beispielfall bedeutet das, wenn die Struktur eine Breite größer als die 5-fachen Wellenlänge hat, so werden bei 20 cm Strukturbreite, Frequenzen von größer 8500 Hz geometrisch gerichtet reflektiert.

$$\lambda = \frac{b}{5} = \frac{0{,}20}{5} = 0{,}04\,m$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340}{0{,}04} = 8500\ Hz$$

Ebenfalls spiegelnde Reflexionen treten auf, wenn die Wellenlänge wesentlich größer als die Strukturbreite bzw. –länge ist. In dem Fall werden die Schallwellen an

der Grundfläche reflektiert (und die Form der Struktur hat keinen Einfluss auf die Reflektion). Wenn man sich das Zahlenbeispiel ansieht (diesmal ist die Schallwellenlänge 5-mal so groß wie die Strukturabmessungen), kommt man bei 20 cm Strukturbreite auf einen Wert von kleiner als 340 Hz.

$$\lambda = 5b = 0{,}20 * 5 = 1{,}0 \ m$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340}{1{,}0} = 340 \ Hz$$

Zwischen diesen beiden Schranken gibt es einen Bereich, in dem die Wellenlänge so lang ist wie die Strukturabmessungen. In diesem Fall kommt es zu ungerichteten, diffusen Reflexionsanteilen, die sich gleichmäßig im Raum verteilen.
Um das Beispiel mit 20 cm Strukturbreite noch einmal zu bemühen, seien jetzt die diffusen Reflexionen betrachtet (b = λ).

$$\lambda = b = 0{,}20 \ m$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340}{0{,}20} = 1700 \ Hz$$

Oftmals gibt es Reflexionen in Räumen, die weder gerichtet noch diffus sind.

Geometrisch gerichtete Reflexionen

Bei Reflexionsvorgängen in Räumen können die Schallwellen näherungsweise durch Schallstrahlen dargestellt werden, um z.B. akustische Fragen durch geometrische Überlegungen beantworten zu können. Dadurch wird aber auf bestimmte Eigenschaften der Wellen (z.B. Beugung) verzichtet. Für Reflexionen an ebenen Flächen wird das Spiegelschallquellenmodell angewandt.
Wird an einer ebenen Fläche ein Schallstrahl reflektiert, so konstruiert man seine Spiegelschallquelle, die den reflektierten Strahl aussendet (siehe Abb. 17). Diese Spiegelquelle hat dann die erste Ordnung.

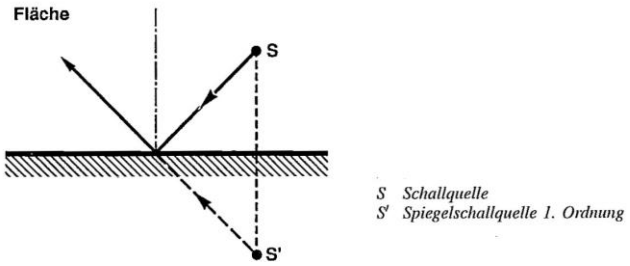


Abb. 17: geometrisch gerichtete Reflexionen an einer Fläche (Quelle: [Fas03])

Kommt es zu weiteren Reflexionen, so wird der Strahl der Spiegelschallquelle nocheinmal reflektiert. Dabei wird wiederum eine Spiegelschallquelle, diesmal von einem bereits reflektierten Strahl konstruiert, die wiederum einen Schallstrahl sendet. Diese Spiegelschallquelle hat dann bereits die zweite Ordnung (siehe Abb. 18).

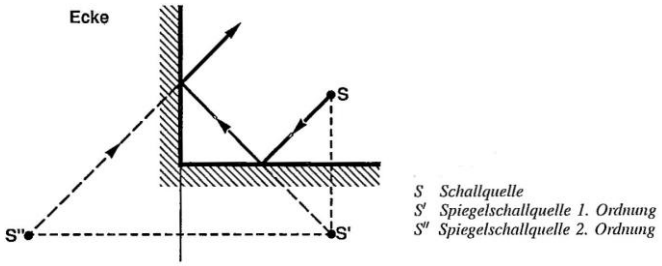


Abb. 18: geometrisch gerichtete Reflexionen an einer Ecke (Quelle: [Fas03])

Der Grad der Spiegelschallquellen gibt die Anzahl der Reflexionen des Strahls an (siehe Abb. 19). Diese Modellvorstellung wird als Grundlage für die computerunterstützte Simulation der Schallausbreitung verwendet (siehe Kap. 4.2.2).

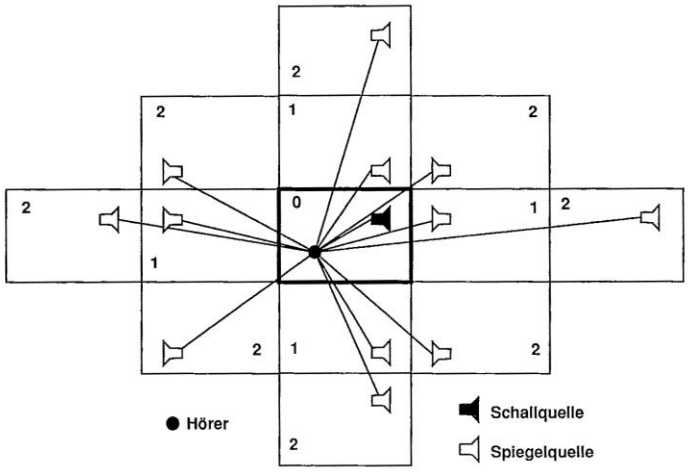


Abb. 19: Prinzipbild mit Schall- und Spiegelquellen (Quelle: [Fas03])

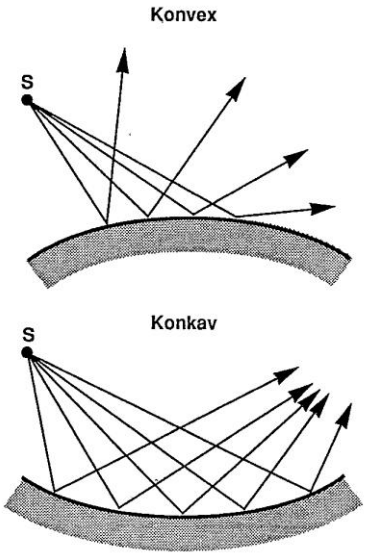


Abb. 20: Reflexionen an konvex und an konkav gekrümmten Flächen (Quelle: [Fas03])

Je nach Fläche (Form und Oberflächentyp) werden die Schallstrahlen unterschiedlich reflektiert, wobei gekrümmte Oberflächen den Schall bündeln bzw. streuen können (siehe Abb. 20).
Auch der Ort des Senders kann zur Schallausbreitung beitragen (siehe Abb. 20).

Diffuse Reflexionen

Gleichmäßig über den Raum verteilte Schallreflexionen werden als diffuse Reflexionen bezeichnet, die durch den Diffusitätsgrad bzw. den Streugrad über die Schallenergieverhältnisse gekennzeichnet werden (siehe Unterkapitel „Absorption und Reflexion“). Zur gestreuten Energie können reflektierte Schallstrahlen gezählt werden, die mehr als ± 10° von den gerichteten Reflexionen abweichen.
Diffusitäts- oder Streugrade von 0 bedeuten geometrisch gerichtete Reflexionen. Ein Streugrad von 1 bedeutet, dass keine Energie in Richtung der spiegelnden Energie reflektiert wird. Ein Diffusitätsgrad von 1 zeigt eine völlig gleichmäßige Verteilung der Reflexionen an.

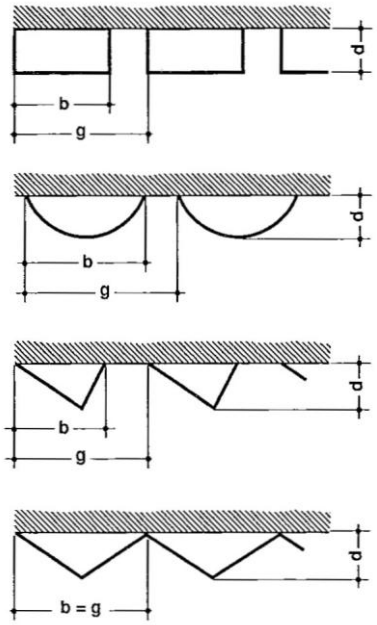


Abb. 21: Beispiele für geometrische Strukturen für diffuse Reflexionen (Quelle: [Fas03])

Im Bild (siehe Abb. 21) werden verschiedene Strukturformen vorgestellt, die zur Erzielung einer hohen Diffusität eingesetzt werden. Den höchsten Difffusitätsgrad (≈ 0,8) erreicht man, wenn der Frequenzbereich, in dem die Strukturperiode g liegt, das ca. ein- bis zweifache der Wellenlänge beträgt. Eine optimale Frequenz f_{opt} erhält man aus:

$$f_{opt} \approx \frac{500}{g} \; in \; [Hz]$$

$$mit$$

$$g.....Strukturperiode \; in \; [m]$$

Die Strukturbreite b sollte gleich bzw. größer als die halbe Strukturperiode g sein. Bei dreieckigen bzw. zylindrischen Formen kann eine dichtere Folge der Strukturen (b=g) wirkungsvoller sein.

$$d \approx (0{,}3 \; bis \; 0{,}5) b \; in \; [m]$$

Hohe Diffusitäten bei den Reflexionen sind auf einen sehr engen Frequenzbereich beschränkt, von ca. 1 bis 2 Oktaven beschränkt. Zylindrische und dreieckige Formen wirken auf einen größeren Frequenzbereich (mehr Bandbreite). Möglich sind auch Kombinationen oder Sonderformen von Diffusoren.

2.3.1.2 Definition

Zur Definition der Nachhallzeit nach Sabiné:
Wallace Clement Sabine (1868-1919) fand 1898 heraus, dass sich die Nachhallzeit *T* proportional zum Raumvolumen *V* und umgekehrt proportional zu der äquivalenten Absorptionsfläche *A* verhält (*k* ist die Proportionalitätskonstante)… [http://de.wikipedia.org/wiki/Nachhallzeit; 1.6.09; Suchbegriff: „Sabine“]:

$$T = 55{,}3\frac{V}{A * c_0} = 0{,}163\frac{V}{A} \qquad [\text{sec}]$$

mit

V.....*Raumvolumen* $\left[m^3\right]$

c_0.....*Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Luft*; $c_0 \approx 340\ \left[m/s\right]$

A.....*äquivalente Schallabsorptionsfläche* $\left[m^2\right]$

Die Nachhallzeit nach Sabiné stellt für Räume, mit geringeren Schallabsorbierenden Eigenschaften (d.h. ein mittlerer Absorptionsgrad von bis zu 0,3), einen hinreichend genauen Zusammenhang dar (z.B. für Konzertsäle). Für Räume, die eine höhere Schallabsorption haben (z.B. ein Tonstudio) ist die Nachhallzeitformel von Eyring besser geeignet.

$$T = 0{,}163\frac{V}{-\ln(1-\alpha_{Raum})S_{ges}} \qquad [s]$$

mit

α_{Raum}.....*räumlicher Mittelwert des Schallabsorptionsgrades* $[-]$

S_{ges}.....*Gesamtoberfläche aller Raumbegrenzungen* $\left[m^2\right]$

V.....*Raumvolumen in* $\left[m^3\right]$

Bei der Definition der Nachhallzeit ergab sich ein weiteres Problem. Da die Nachhallzeit nur dann mit der Nachhalldauer in Relation gesetzt werden kann, wenn der Abklingvorgang des Schalldruckpegels nahezu exponentiell erfolgt, wird die Nachhallzeit schon bei geringeren Pegelminderungen ermittelt (vgl. EDT).

Außerdem ist es in vielen Räumen aufgrund der verfügbaren Dynamik nicht möglich, so große Schalldruckpegelminderungen wahrzunehmen, da das Schallsignal unter den Grundgeräuschpegel gefallen ist. Der Beginn der Abklingkurve (siehe Abb. 22) wird einerseits besser gehört und stimmt andererseits bei Musikdarbietungen eher mit der subjektiv empfundenen Nachhalldauer überein.

Anfangsnachhallzeit:

Man versteht darunter der Anfangsnachhallzeit oder auch EDT (Early Decay Time) die Zeit, die der Schalldruckpegel zum Absinken um 10 dB benötigt. Die Anfangsnachhallzeit ist stärker vom (Zuhörer-) Platz abhängig, wodurch sie nicht zur generellen Charakterisierung der akustischen Qualität von Räumen herangezogen wird, sondern eher für die Beurteilung einzelner (Platz-) Bereiche verwendet werden kann. Dabei ist bei Musikdarbietungen davon auszugehen, dass der Platz akustisch „besser“ ist, wenn das Verhältnis zwischen Nachhallzeit und Anfangsnachhallzeit größer ist.

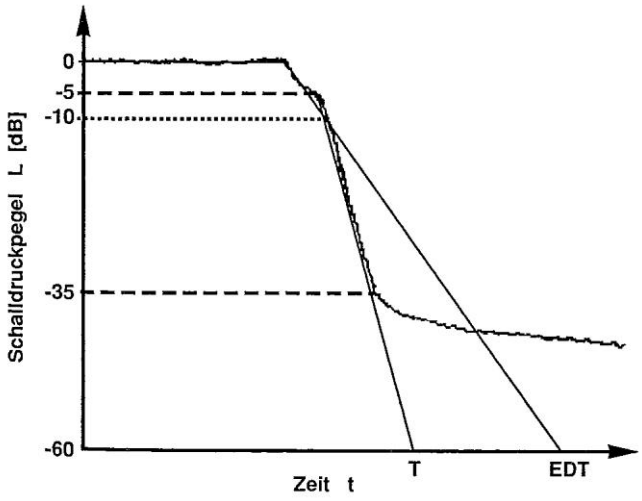


Abb. 22: Definition der verschiedenen Formen der Nachhallzeit (Quelle: [Fas03])

2.3.2 Energiekriterien

Raumimpulsantwort

Die Raumimpulsantwort ist eine Verteilung von am Hörort eintreffen Reflexionen.
Aus einer zeitlichen Folge von Schallrückwürfen (Reflexionen), ausgelöst durch einen kurzen Schallimpuls, lässt sich die Raumimpulsantwort messtechnisch erfassen.
In der Theorie wird dabei das Schallfeld eines Raumes vollständig beschrieben. Dieser Zusammenhang ist für die Verwendung als Grundlage in raumakustischen Mess- und Simulationsverfahren wichtig.

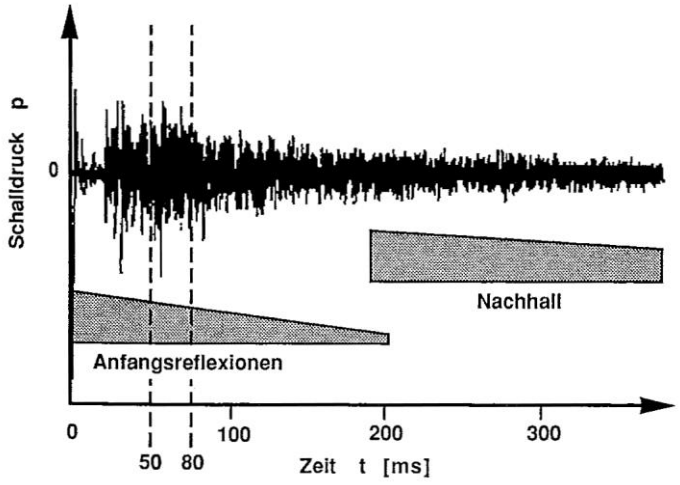


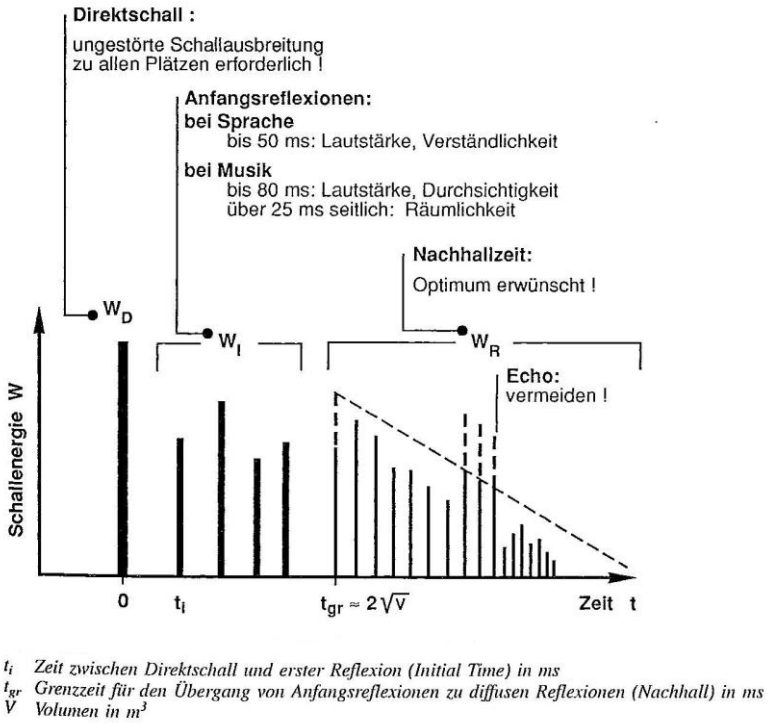
Abb. 23: Raumimpulsantwort dargestellt in Form eines Echogramms (Quelle: [Fas03])

Aus dem Echogramm (Reflektogramm) lässt sich die Raumimpulsantwort ablesen und interpretieren. Der Idealfall sieht wie ein sich „verjüngender Tannenbaum“ aus. Störende Einflüsse (z.B. späte Reflexionen - Echoerscheinungen) sind als – aus der Einhüllenden des Reflektogramms – „herausspringende Zacken“ sichtbar. [Fas03]

In einem Teil der Impulsantwort steckt das Abklingverhalten, das durch die Nachhallzeit charakterisiert wird. Dafür sind die späten Reflexionen verantwortlich.

Energieanteile

Aus dem Echogramm sind aber auch die verschiedenen Energieanteile des Schalls herauszulesen. Interessant sind hier die frühen Anteile der, zum größten Teil, Anfangsreflexionen, die je nach Zeiteinwirkung positiv oder negativ in die Hörbarkeit von Sprache und Musik einfließen können (vgl. Kap. 2.3.1.1 - Zeiteinwirkung).



t_i *Zeit zwischen Direktschall und erster Reflexion (Initial Time) in ms*
t_{gr} *Grenzzeit für den Übergang von Anfangsreflexionen zu diffusen Reflexionen (Nachhall) in ms*
V *Volumen in* m^3

Abb. 24: Schematisierte Raumimpulsantwort (Quelle: [Fas03])

Im Bild (siehe Abb. 24) werden die verschiedenen Gruppen an Energieanteilen in deren zeitlichen Verlauf gezeigt. Aus den verschiedenen Verhältnissen von Energieanteilen, meistens in Relation zur Gesamtenergie, lassen sich platzabhängige Aussagen über die Verständlichkeit treffen (z.B. Deutlichkeit).

Die nun einzeln vorgestellten Kriterien sind je nachdem nur für Sprache oder Musik, oder für beide Fälle als Bewertungskriterium geeignet.

2.3.2.1 Deutlichkeit

Für die Sprachverständlichkeit ist das Verhältnis der bis etwa 50 ms reflektierten, eingefallenen Schallenergie, bezogen auf die gesamte Schallenergie, maßgebend. Daraus lässt sich der Deutlichkeitsgrad bzw. die Deutlichkeit (Definition) als dimensionslose Größe bzw. in [%] berechnen.

$$D_{50} = \frac{W_{0...50\ ms}}{W_{ges}}\ [-]$$

Alternativ kann auch das Deutlichkeitsmaß (anlog zum Klarheitsmaß) in [dB] berechnet werden.

$$C_{50} = 10 \log \frac{W_{0...50\ ms}}{W_{50\ ms...\infty}}\ in\ [dB] =$$

$$= 10 \log \frac{D_{50}}{1 - D_{50}}\ in\ [dB]$$

2.3.2.2 Durchsichtigkeit, Klarheitsmaß

Da Musikdarbietungen oft sehr subjektiv wahrgenommen werden, ist eine akustische Bewertung eher schwierig. In der Musik ist die Erkennbarkeit von Tönen bzw. der Abfolge derselben interessanter. Das Klarheitsmaß (Clarity) kann als Bewertungsgröße für die zeitliche als auch klangliche Durchsichtigkeit eines oder mehrerer Instrumente dienen. Es wird definiert als die Schallenergie der Anfangsreflexionen bis 80 ms und der restlichen Schallenergie:

$$C_{80} = 10 \log \frac{W_{0...80\ ms}}{W_{80\ ms...\infty}}\ in\ [dB]$$

Je nach Musikstil (z.B. Barock oder Romantik) kann mehr oder weniger Klarheit erwünscht sein, wobei hier die Grenzwerte, im Gegensatz zur Deutlichkeit bei der Sprachübertragung, weniger scharf formuliert sind.

2.3.2.3 Schalldruckpegelabnahme

Ein Kriterium, das weniger mit der Schallenergie zu tun hat, ist die Abnahme des Schalldruckpegels.
Bei diesem Merkmal geht es um die bei der Schallübertragung ausreichend vorhandene Lautstärke am Hörerplatz. Interessant ist dieses Maß für die Stärke der Schallquelle bei der Schallausbreitung in diffusen Schallfeldern.

2.3.2.4 Schwerpunktzeit

Ein Kriterium für die Verständlichkeit von Sprache, das aber auch für Musik angewandt werden kann, ist jener Zeitbereich, an dem die Schallenergie einen Maximalwert annimmt. Diese Angabe zeigt an, ob es sich bei den Schallenergieanteilen um günstige oder ungünstige Anteile handelt, und gibt einen wesentlich weniger scharf formulierten Grenzwert an. Die Schwerpunktzeit (Center Time) kann, da ein gewisser Zusammenhang zur Nachhallzeit besteht, auch für die näherungsweise Betrachtung des Abklingverhaltens herangezogen werden.

Die Schwerpunktzeit wird bestimmt durch:

$$TS = \frac{1}{W_{ges}} \int_0^\infty t * W(t)\, dt \quad in\ [\mathrm{sec}]$$

2.3.2.5 Seitenschallgrad

Um das Gefühl der Räumlichkeit von Musik zu erzeugen, kommt es auf die seitlich einfallenden, frühen Reflexionsanteile an. Dabei bekommt der Zuhörer die Seitenwandreflexionen vor den Deckenreflexionen zu hören, was in vergleichsweise schmalen, langen und hohen Räumen (z.B. dem Wiener Musikvereinssaal) der Fall ist.
Diese Räume, die gern mit „Schuhkartons“ verglichen werden, sind bekannt für „eine gute Akustik“.

Ein dafür objektives Kriterium findet sich im Seitenschallgrad (Lateral Energy Fraction) wieder. Er ist als Verhältnisgröße von Energieanteilen der bis zu 80 ms

seitlichen und frontal einfallenden Reflexionen definiert. Bei den seitlichen einfallenden Reflexionsanteilen ist der Direktschallanteil herausgenommen:

$$LF = \frac{(W_{5...80\ ms})_{seitlich}}{W_{0...80\ ms}}\ in\ [-]\ oder\ in\ [\%]\ ausgedrückt$$

Alternativ kann auch das Seitenschallmaß mit:

$$10 \log LF\ in\ [dB]$$

ermittelt werden.

2.3.3 Grenzwerte

Höreindruck	Kriterium	Optimum	
		Sprache	Musik
Nachhall, Klangfarbe	Nachhallzeit T (s. Bilder 4.54 u. 4.55)	ca. 1 s	ca. 2 s
	Anfangsnachhallzeit EDT	–	ca. 2,2 s
	Baßverhältnis BR	–	1,1 bis 1,3
Deutlichkeit,	Deutlichkeitsgrad D_{50}	> 50%	–
Durchsichtigkeit	Deutlichkeitsmaß C_{50}	> 0 dB	–
	Schwerpunktzeit TS	< 80 ms	100 bis 150 ms
	Klarheitsmaß C_{80}	–	−1 bis +3 dB
	Artikulationsverlust für Konsonanten Al_{cons}	< 15%	–
	Sprachübertragungsindex RASTI	> 50%	
Raumeindruck	Hallmaß H		+3 bis +8 dB
	Seitenschallgrad LF	–	25 bis 40%
	Seitenschallmaß 10 lg LF	–	−4 bis −7 dB
	Raumeindrucksmaß R	< 0 dB	+1 bis +7 dB
Lautstärke	Schalldruckpegelminderung ΔL	< 5 dB(A)	< 5 dB(A)
	Stärkemaß G	+1 bis +10 dB	+1 bis +10 dB

Abb. 25: Raumakustische Kriterien und ihre Optimalwerte (Quelle: [Fas03])

In Abb. 25 sind die Optimalwerte für sämtliche, in den Kapiteln 2.3.1 und 2.3.2 angeführten raumakustische Bewertungskriterien zusammengefasst. Viele Werte stellen Anhaltspunkte dar, manche Werte sind sehr genau formulierte Grenzen. Für

jede Art von Betrachtung und Bewertung von Raumakustik sei auf einschlägiges Normen- und Regelwerk verwiesen.
In der vorliegenden Arbeit wurden einige dieser Kriterien, die aus der Literatur entnommen wurden (siehe [Fas03]), für die Beurteilung herangezogen.

3 Bisherige Ergebnisse

3.1 Überblick

Bereits im Juni 2006 wurde der erste Versuch, die Raumakustik der Pfarr- und Wallfahrtskirche Mariabrunn zu untersuchen, gestartet.
Geplant waren Messungen der Nachhallzeit, die dann mit einem rasch erstellten, sehr einfachen Modell verglichen werden sollten.

Abb. 26: Vorbereitung zur Nachhallzeitmessung im Juni 2006 (Quelle: eig. Aufnahme)

Gemessen wurde an 3 Sendestandorten mit jeweils 4 Empfängerpositionen (siehe Abb. 26 - Durchführung und Abb. 27 – Messprogramm)

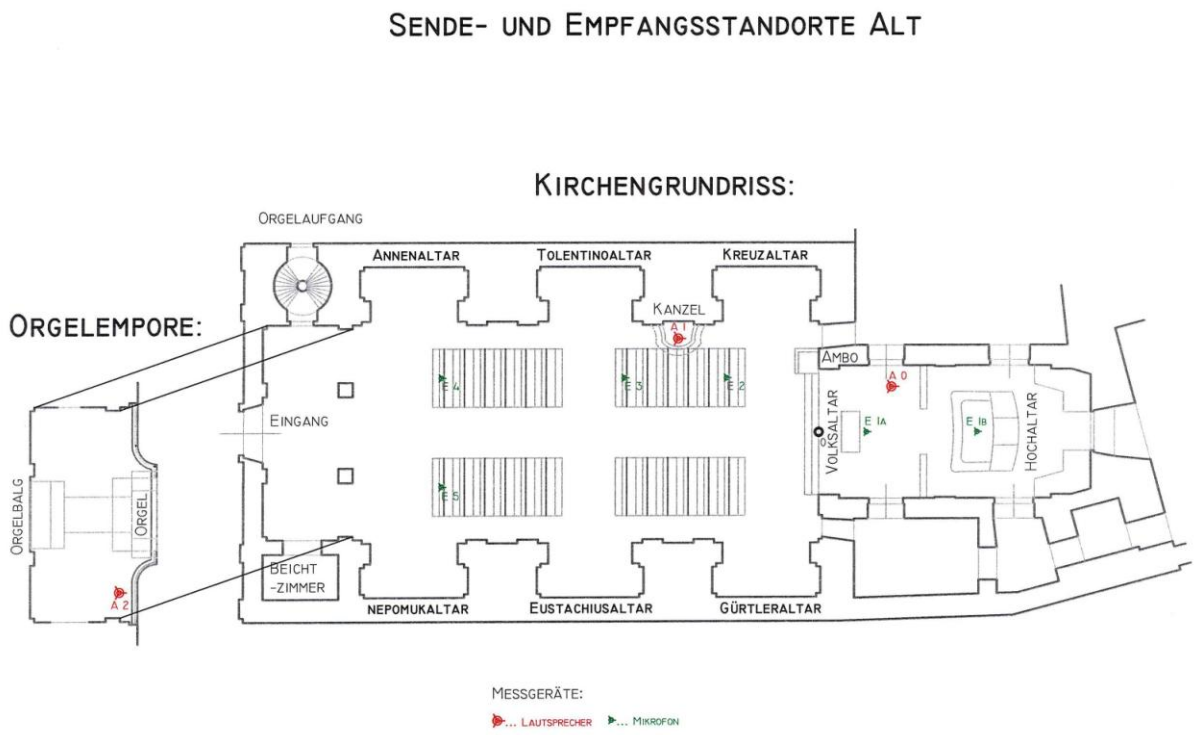


Abb. 27: Messpunkte – Messung vom 27. 06 .2006 (Quelle: eigene Darstellung)

Mit den Hauptabmessungen der Kirche und einer einfachen Auswahl an Absorptionsgraden wurde ein Modell erstellt mit dem, parallel neben den Messungen, Simulationsdurchgänge durchgeführt wurden (siehe Abb. 28).

Abb. 28: Erstellen des vereinfachten Simulationsmodells im Juni 2006 (Quelle: eig. Aufnahme)

3.2 Ergebnisse vom Juni 2006

Die Messergebnisse wurden verarbeitet und die mittlere Sabine´sche Nachhallzeit berechnet (siehe Tab. 2). Diese Werte dienten als Vergleichsbasis für das neue umfangreichere Simulationsmodell.

Beim Simulationsmodell, das mit dem Messergebnis näherungsweise übereinstimmte, wurde deutlich, dass im Bereich der Orgelempore gewisse Ungenauigkeiten bestehen. Als Abhilfe wurde die genauere Modellierung der Orgelempore ins Auge gefasst, da durch die vielen Flächen der Orgel und der besonderen Absorptionswirkung des Orgelprospekts ein noch genaueres Modell benötigt wurde.

4 Durchführung

4.1 Geometrie

4.1.1 Ausgangspunkt, Quellen

4.1.2 Erhebung

Um mit der Erstellung des Simulationsmodells beginnen zu können, waren brauchbare geometrische Daten der Struktur notwendig. Von der Kirche existieren zahlreiche Bestandspläne, die oft nur einen Gebäudeteil, oder sogar nur einzelne Bauteile darstellen. Eine umfangreiche Bauaufnahme (siehe Abb. 29) wurde unter anderem von Dr. Adalbert Klaar (Sachbearbeiter für Planaufnahmen im Bundesdenkmalamt) in den späten 1940-er Jahren in vielen Kirchen Ostösterreichs erstellt.

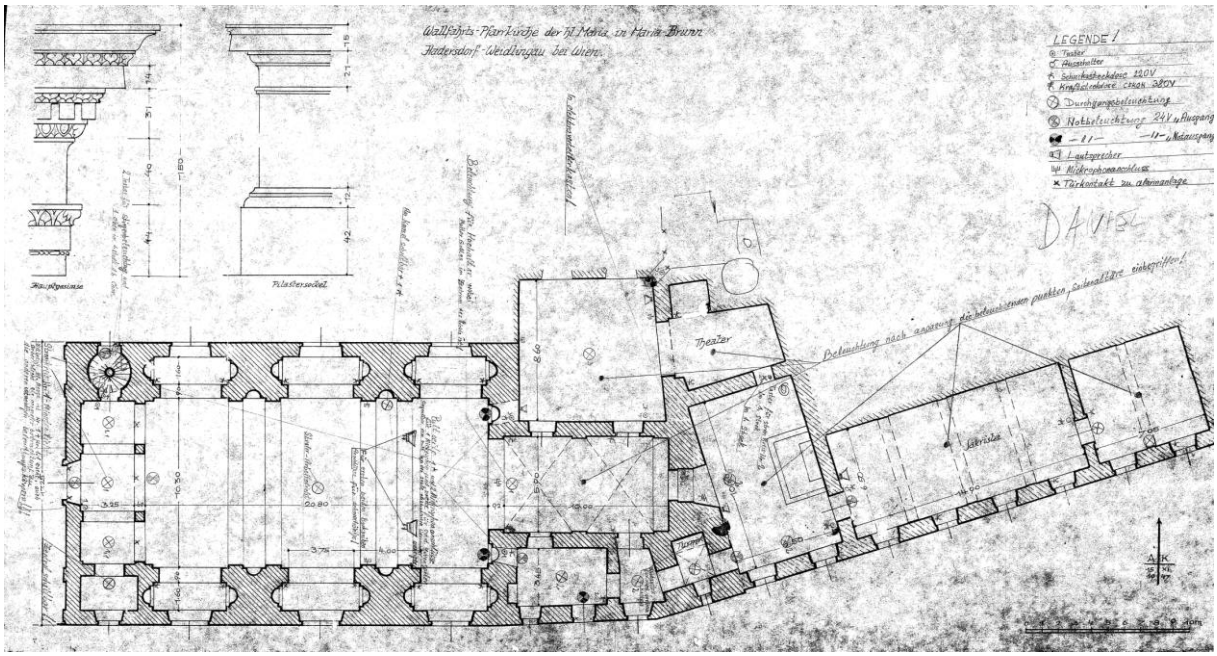


Abb. 29: Orginalplan von A. Klaar – mit elektrotechnischen Ergänzungen (Quelle: Pfarre Mariabrunn)

Dieser Plan war eine gute Basis zur Ergänzung und Überprüfung der Abmessungen mittels Laser-Entfernungsmessers („Leica Disto“ – Modell A5). Der daraus entstandene Plan wurde immer wieder überarbeitet, um einerseits die richtigen Abmessungen und andererseits ein stimmiges Gesamtbild zu erhalten.

4.1.3 Ergebnisse

Das Ergebnis war ein Plan (siehe Abb. 30) mit den Rauminnenmassen, wobei auch die barocke Symmetrie in die planliche Darstellung eingeflossen ist. Die Position der Einrichtungsgegenstände wurde ebenfalls in den Plan eingetragen.
Bei der gesamten Aufnahme wurde immer wieder auf die Plausibilität der Messergebnisse geachtet. Als Ergebnis entstanden Pläne des Kircheninnenraumes, aus denen die einzugebenden Punkte für die virtuelle Kirche herausgenommen wurden.

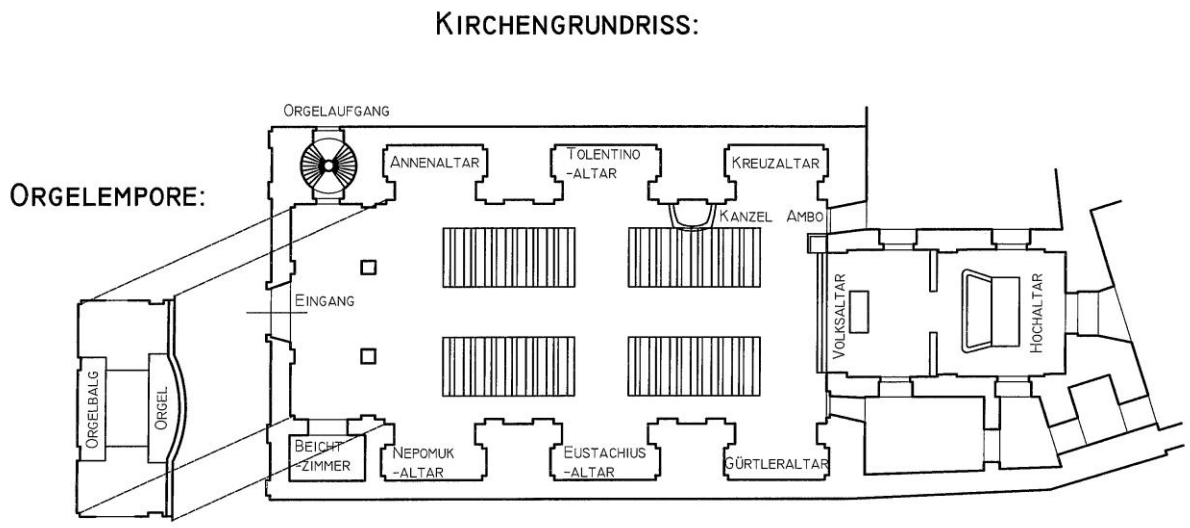


Abb. 30: Digitalisierter und bearbeiteter Grundriss der Pfarrkirche Mariabrunn (Quelle: eig. Darstellung)

Die oben gezeigten Abbildungen sollen exemplarisch die Erfassung der Geometrie zeigen. Die restlichen Innenansichten sowie die Auswahl der Punkte für die Eingabe in CATT werden im Kapitel 4.2.4 - Modellerstellung gezeigt.

4.2 Simulation

4.2.1 Allgemein

CATT ist ein raumakustisches Simulationsprogramm, das auf Basis eines Spiegelschallquellen-Modell [„Image Source Modell“ (ISM)] qualitative Aussagen über die Frühphasen des Echogramms liefern kann. Für die detaillierte Berechnung der Auralisation wird das Kegel-Spur-Verfahren (RTC), sowie die Strahlverfolgungsmethode (Ray-Tracing) verwendet um Ergebnisse für die Publikumsbereiche farblich darstellen zu können. [Cat07]

Das System besteht aus einem 32-bit Hauptprogramm (Mehr Dateien Interface) mit notizblockähnlich angeordneten Maskeneditoren, die über Textschnittstellen mit dem Hauptprogramm kommunizieren. Hinzu kommen noch Utilities, sowie die Hilfsprogramme.
Zu den Utilities zählen ein eigenständiger 3D-Viewer auf OpenGL –Basis, ein Plot-Viewer, einige DXF- Schnittstellenprogramme, ein Satz AutoLISP-Files zur

Verwendung mit der AutoCad Schnittstelle, usw. Als Hilfsprogramme dienen CATT-Walker und Walk-Decim. [Cat07]

4.2.2 Funktionsübersicht der Software

Spiegelschallquellenverfahren

Diese Verfahren wurde bereits in Kapitel 2.3.1.1 – Abschnitt „*geometrisch gerichtete Reflexionen“* behandelt.

Ergänzend sei angemerkt, das bei jeder Reflexion die Schallabsorption und die Streuung mitberücksichtigt werden müssen. Durch das Hinzufügen von Spiegelquellen erhöht sich die Ordnung analog einer geometrischen Reihe. Die Raumimpulsantwort für bestimmte Zuhörerplätze kann dadurch immer genauer ermittelt werden. Um jedoch den Rechenaufwand in Grenzen zu halten, wird die immer weitere Berechnung von Spiegelquellen vorzeitig abgebrochen und ein exponentiell abklingender „Nachhallschwanz“ aus der berechneten Nachhallzeit konstruiert.

Beide Teile werden zur gewünschten Raumimpulsantwort zusammengefügt.

Dieses Verfahren wird als Grundlage für computerunterstützte Simulationsverfahren (beispielsweise in CATT) verwendet. [Fas03]

Strahlverfolgungsmethode (Ray-Tracing)

Von einer Schallquelle lässt man gedanklich die sich strahlenförmig ausbreitenden Schallteilchen, wie bei einem Kegel, ausgehen. Über die Teilchendichte bzw. –energie kann die Richtcharakteristik berücksichtigt werden. Die Teilchen werden rechnerisch durch den Raum verfolgt. Trifft dieses Teilchen auf eine Wand, so wird es entweder geometrisch oder diffus, je nach Streugrad, reflektiert. Das Ergebnis ist die Anzahl, Ankunftszeit, Energie und eventuell die Herkunftsrichtung, der an definierten Zählflächen auftreffenden Teilchen. Dadurch lässt sich für jede Zählfläche eine zeitliche Energieverteilung, die näherungsweise eine Energie-Impulsantwort darstellt, ermitteln. [Mül03]

Eingangsgrößen, Annahmen

Räumliches Modell aus ebenen Flächen mit einer zugewiesenen Oberfläche in Form eines Absorptionskoeffizient und Streugrades.

Ausgangsgrößen

Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt in 3 Kategorien:

Audience area mapping (farbige Parameterdarstellung)
Darstellung des Direktschallfeldes über ausgewählten Empfangsflächen, mittels Strahlverfolgungsmethode. [Cat07]

Early part detailed ISM (Anteil der Anfangsreflexionen aus dem Spiegelquellenmodell)
Detaillierte Anfangsreflexionen werden auf Basis des Spiegelquellenverfahrens aus der qualitativen Beurteilung von Reflexionen ermittelt. [Cat07]

Full detailed calculation (Genaue, vollständige Berechnung)
Ausführliche Echogrammanalyse basierend auf der RTC (Kegelspurverfahren mit einem nach dem Zufallsprinzip korrigierten Kegelstumpf), die für Parameterstudien und Auralisation herangezogen werden können. [Cat07]

4.2.3 Eingangsgrößen

Überblick:

Ein Ziel der Simulation des Kirchenraumes soll die Vorabberechnung eines akustischen Messprogramms für neuerliche Messungen bzw. eine Nachrechnung der gegenwärtigen Situation in der Kirche sein. Einerseits um für die Nutzung das eine oder andere „akustische Geheimnis“ zu lüften, andererseits um bauliche Zustände nachstellen zu können, die existiert haben. Dabei sei auf die zweite Empore, die über der bestehenden Orgelempore errichtet war, verwiesen.

Die Simulationsergebnisse sollen helfen, Standorte für Lautsprecher und Mikrofone zu ermitteln, damit viel gezielter akustische Messungen geplant und vorbereitet werden können. Damit können in der Untersuchungsphase des Modells Messpunkte und damit Arbeitszeit gespart werden. Durch die Simulation können auch gezielt „Fragen an die Raumakustik“ gestellt werden, die durch Betrachtung von verschiedenen Sendepositionen beantwortet werden können.

Konzeption:

Basis für die Durchführung der Simulation eines Raumes im allgemeinen sind seine geometrischen Abmessungen. Hierbei sind vor allem die Innenabmessungen interessant. Um den Arbeitsaufwand in Grenzen zu halten, und die Übersichtlichkeit zu steigern, sind Vereinfachungen der tatsächlichen Struktur notwendig (siehe Abb. 29 und Abb. 30). Aus akustischer Sicht sind geometrische Elemente kleiner als ca. 1 – 2 m irrelevant.
Dadurch werden Mauervorsprünge, Gesimse, Lysenen vereinfacht wiedergegeben. Altarverzierungen und barocke Verzierungen von Einrichtungsgegenständen sind aus akustischer Sicht ebenfalls weniger interessant. Theoretisch ließe sich sogar ein Großteil der Einrichtung nur akustisch (in Form der Zuweisung von Streu- und Absorptionseigenschaften) abbilden.
Teilweise werden sie aber trotzdem abgebildet, um einerseits den Eindruck der Kirche nicht zu verändern (optische Nachvollziehbarkeit des Modells) und andererseits um bei der akustischen Nachbildung weniger Abweichungsmöglichkeiten zu erhalten (siehe Abb. 31).

Abb. 31: Kirchenraum – Blick zur Orgelempore mit Modellvergleich (Quelle: eigene Aufnahme)

4.2.4 Modellerstellung

Um bei der Modellierung der Kirche die Übersicht zu bewahren, wurde das Gesamtsystem in mehrere Abschnitte unterteilt. So wurden z.B. die Abmessungen des Kirchenraumes, des Altarraumes und der Einrichtungsgegenstände in Bereiche mit möglichst gleicher Flächenanzahl eingeteilt. Dadurch lässt sich eine gewisse Systematik bei der Zuweisung von Punkt- und Flächennummern einzuhalten.
Die Flächen wurden fortlaufend von 1 bis 100 nummeriert, wobei die Hunderterstelle den jeweiligen Bereich wieder spiegelt.

Bei den Punkten wurde ein anderes Beschriftungsschema angewandt. Die Tausenderstelle gibt analog zur Flächenbeschriftung den Bereich an.
Bei der räumlichen Beschreibung der Objekte wurden die Punkte am Boden, fortlaufend, jeweils in zusammenhängenden Einheiten durchnummeriert. Die Punkte, die darüber lagen (z.B.) an der Decke wurden in der Hunderterstelle zwischen 1 und 9 nummeriert.
Bei den Gewölben wurde die Nummerierung der Hunderterstelle bis zum Ende des Bogens auf der anderen Gewölbeseite mitgeführt.

Die Bereiche wurden durch Ziffern von 0 bis 5 gekennzeichnet

0…Master (Hauptfile)

1…Altarraum

2…Seitenaltäre

3…Orgelempore

4…Orgel (Instrument)

5…Einrichtungsgegenstände (Altar, Ambo, Kanzel, usw.)

Die folgenden Abbildungen (Abb. 32 bis Abb. 40) zeigen die bearbeiteten Pläne mit den für die Modellierung der Kirche notwendigen ausgewählten Punkten.

Die farbliche Kennzeichnung der Punkte dient der Übersichtlichkeit bei der Eingabe.

Rot eingefärbte Punkte kennzeichnen Ecken des Raumes.

Grün eingefärbte Punkte weisen auf Einrichtungsgegenstände (inkl. Fest eingebaute Objekte wie z.B. Orgel und Altäre)

Die **blauen** Punkte sind notwendige Hilfspunkte, da im Programm nur Flächen definiert werden können, die keine doppelt übereinander liegende Begrenzungslinien aufweisen.

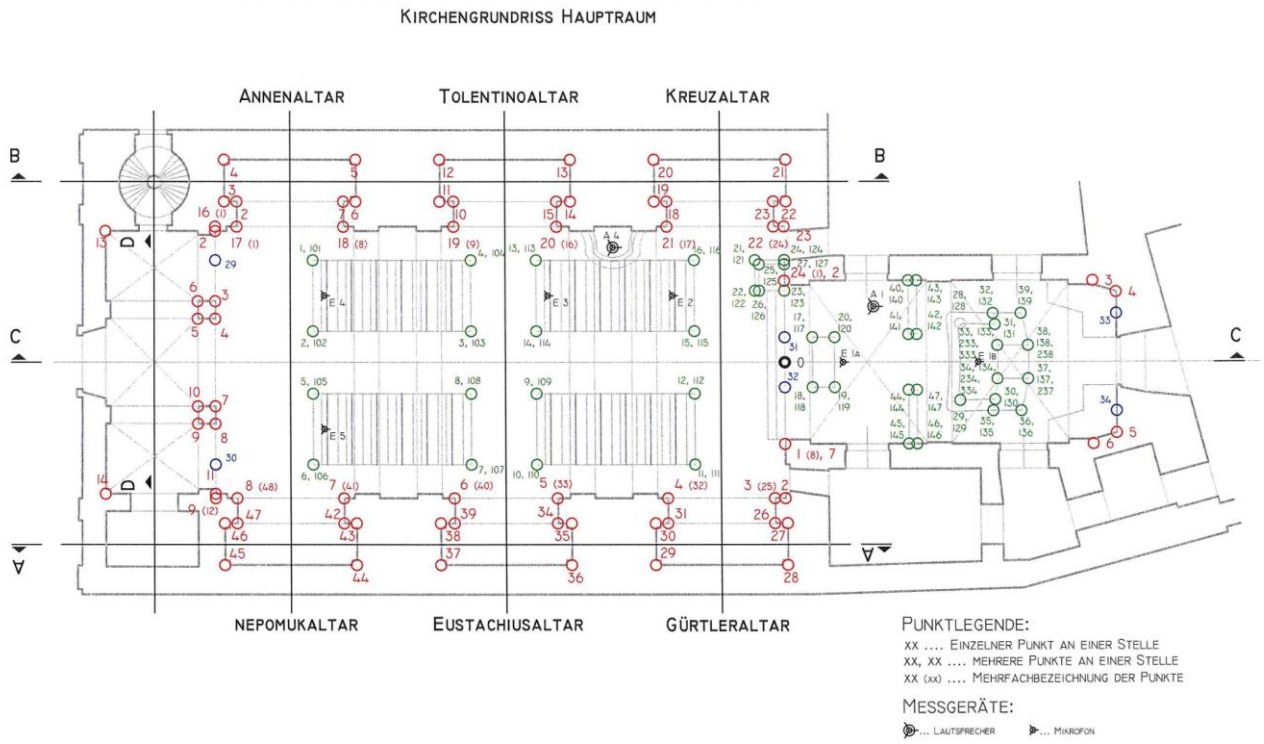


Abb. 32: Grundriss der Kirche – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung)

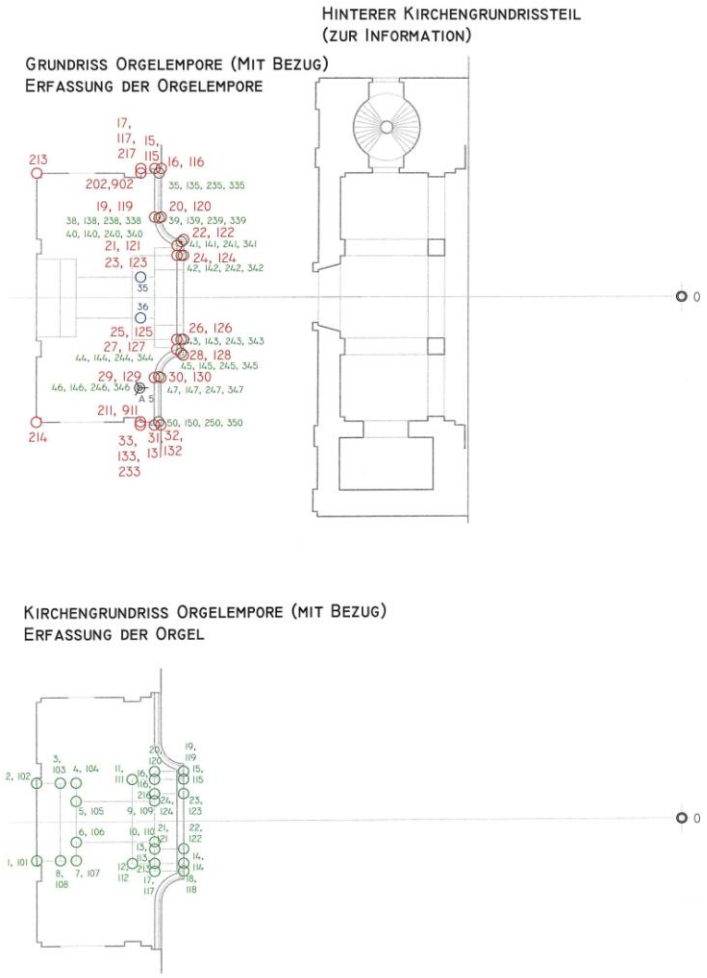


Abb. 33: Grundriss der Orgelempore – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung)

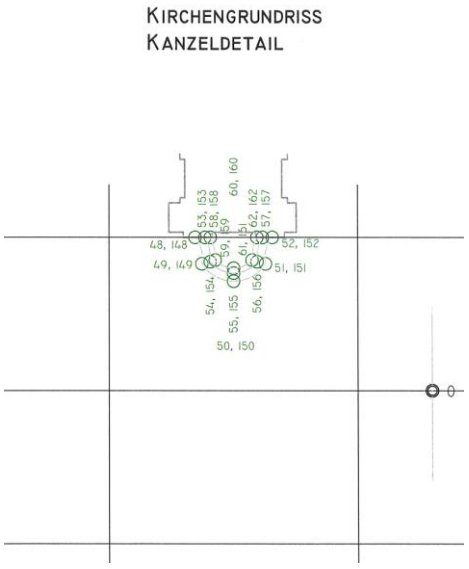


Abb. 34: Teilgrundriss Kanzel – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung)

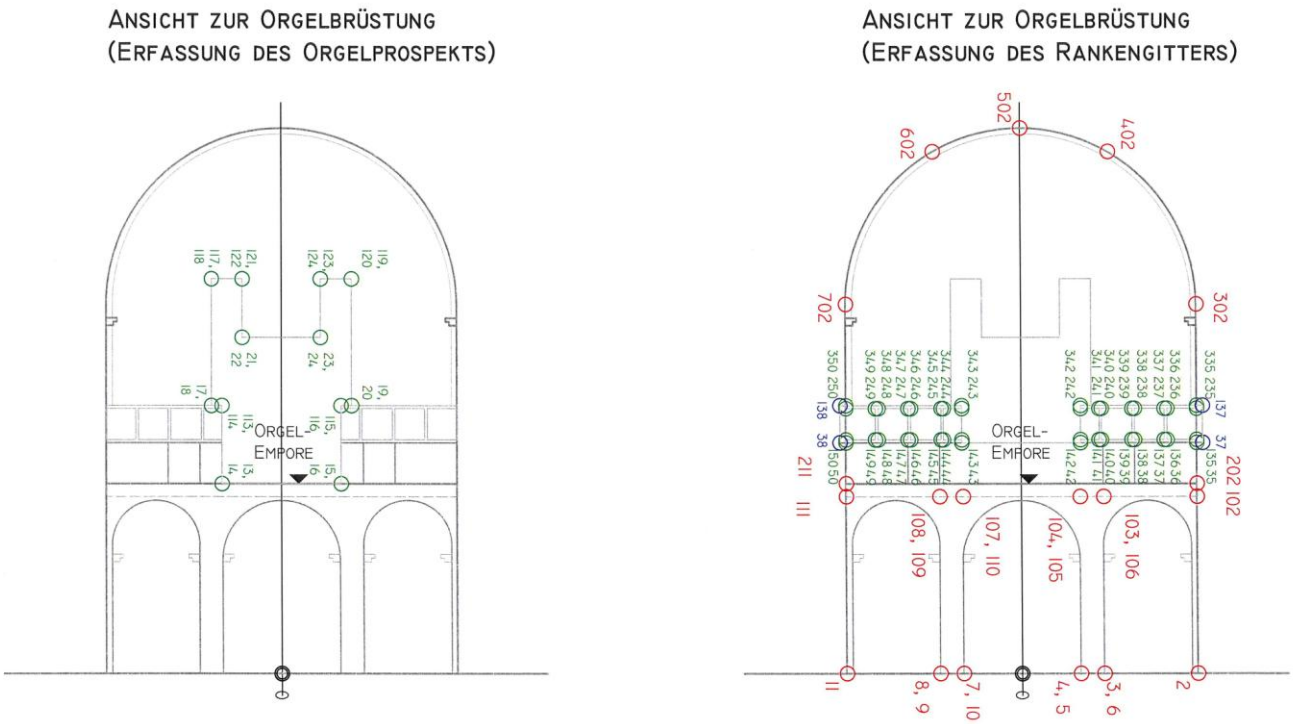


Abb. 35: Ansicht Orgelempore – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung)

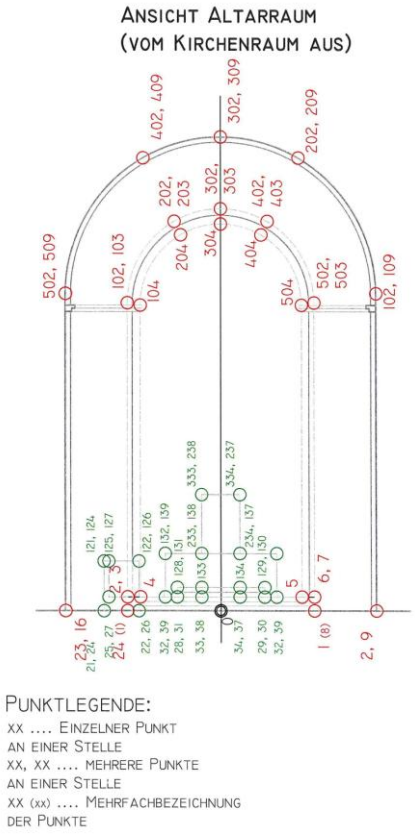


Abb. 36: Ansicht Altarraum – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung)

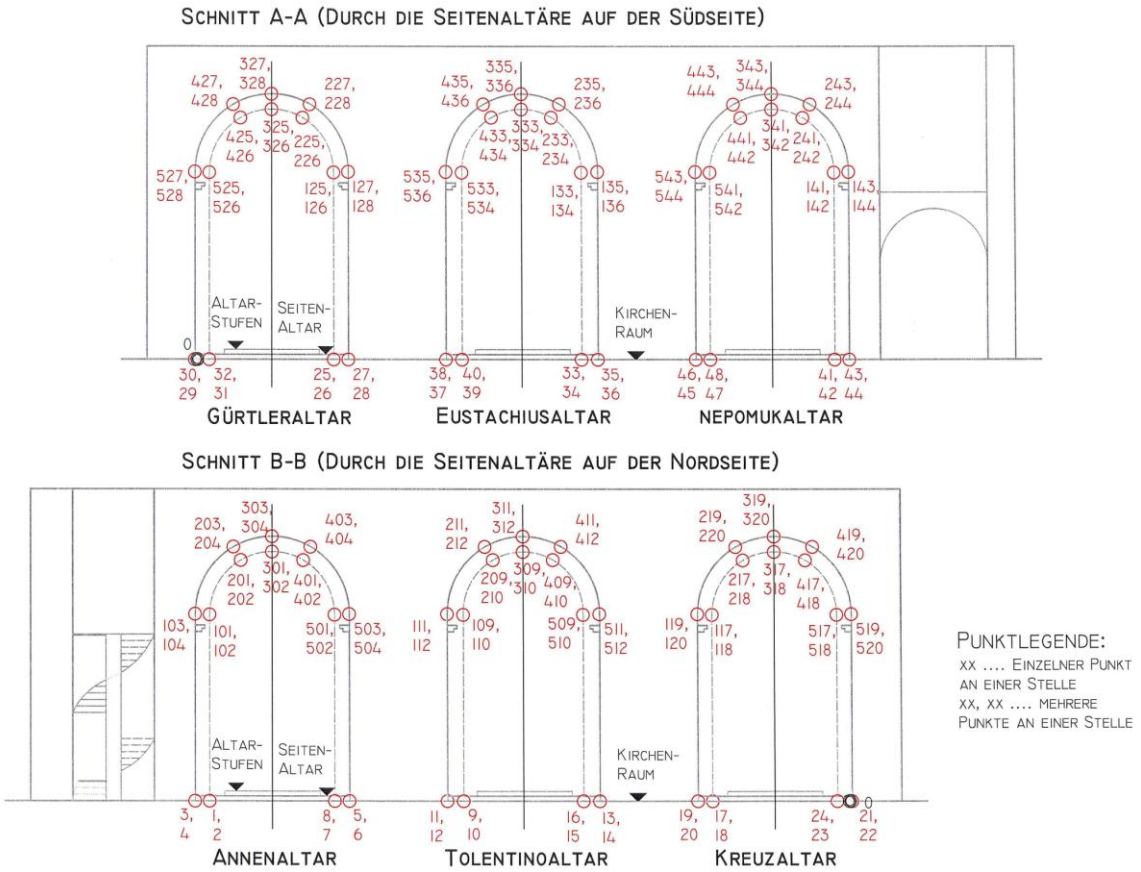


Abb. 37: Schnitt A und B im Kirchenraum – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung)

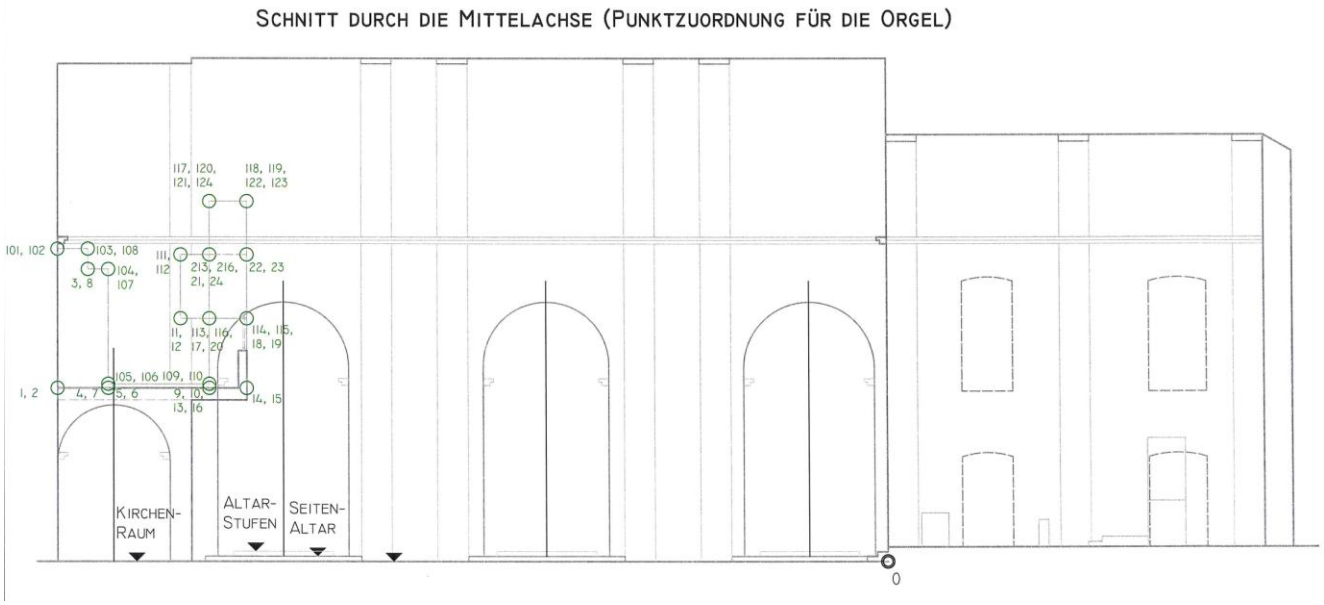


Abb. 38: Schnitt C im Kirchenraum (mit Orgel) – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung)

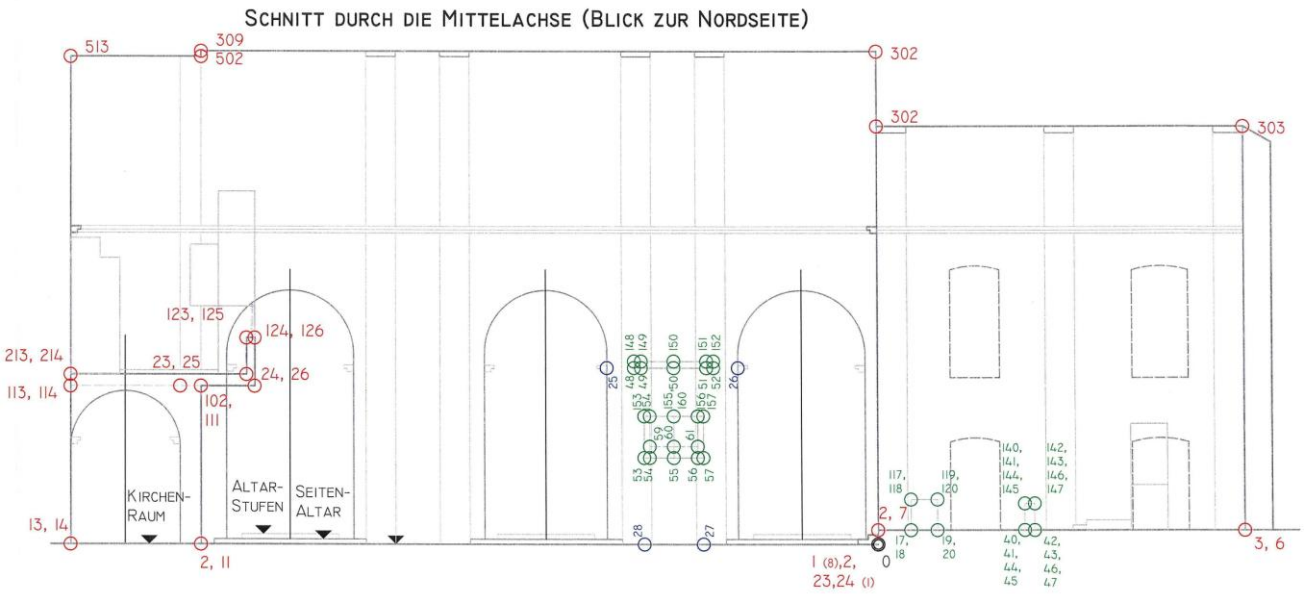


Abb. 39: Schnitt C im Kirchenraum (ohne Orgel) – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung)

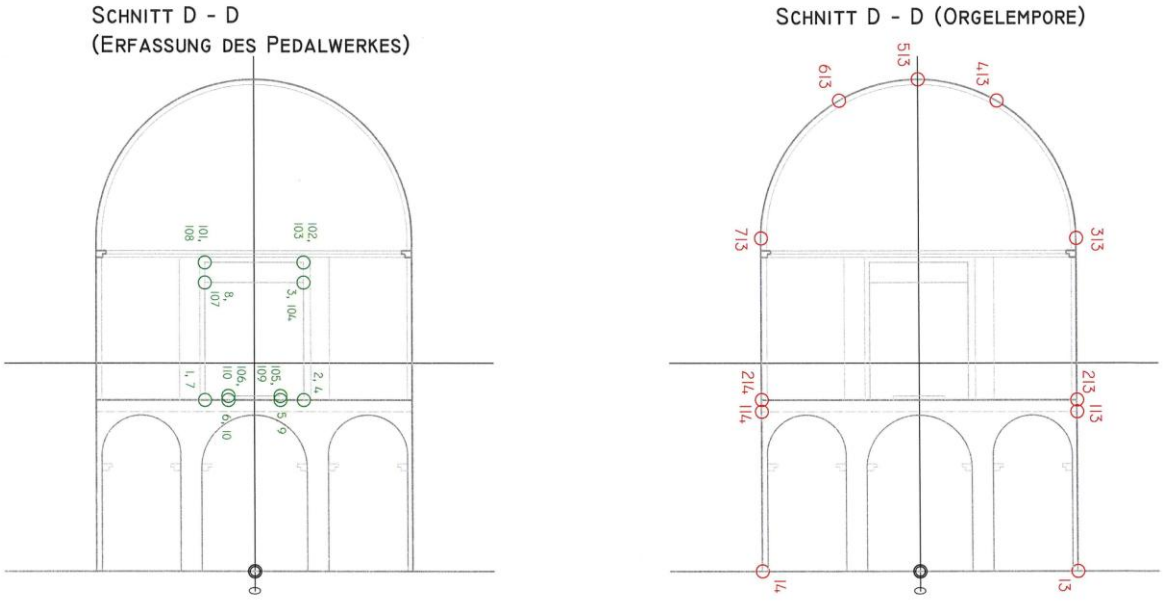


Abb. 40: Schnitt D im Kirchenraum – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung)

4.2.5 Simulationsdurchgänge

Erster Durchgang

In den ersten Durchgängen wurde in erster Linie die Brauchbarkeit des Modells überprüft. Die Werte der Nachhallzeit waren zu Beginn sehr hoch, da die Definition der Absorptionseigenschaften der Flächen einfach war. Im vereinfachten Modell (siehe Abb. 46) wurden ganze Bereiche mit einer Materialeigenschaft versehen, obwohl es innerhalb der Objekte unterschiedliche Eigenschaften gab. Als Beispiel seien die Seitenaltäre bzw. die Orgel angeführt, die im ersten Schritt nur mit einer Materialeigenschaft definiert waren und z.B. zu wenig absorbierend wirkten. Es wurden außerdem Absorptionseigenschaften berücksichtigt (aus [Fas03]) die eher in heutigen Objekten zu finden sind als in barocken Kirchen. Es zeigte sich, dass diese Literaturwerte für ein vereinfachtes Modell durchaus brauchbar, jedoch für eine genauere Betrachtung zu ungenau sind. Darum wurden die Absorptionseigenschaften der einzelnen Flächen in den weiteren Überarbeitungsschritten an die Werte aus dem Buch „Kirchenakustik“ [Mey03] angepasst und ergänzt.

Im Laufe der Simulationsdurchgänge wurden die Streuungseigenschaften (je nach Material bzw. Materialgruppe unterschiedlich) der Materialen weggelassen. Dadurch verringerte sich die Nachhallzeit ein wenig und es gab nur mehr eine Größe, die verändert werden konnte. Dadurch wurden sämtliche Reflexionen weggeblendet und es entstand ein Modell, das nicht mehr der Realität entsprach.

Gegen Ende des ersten Durchgangs zeigte sich ein für die Simulation nicht unerheblicher Fehler. Bei der Definition von Objekten, die vor bzw. hinter einem anderen Objekt, z.B. einer Wand, lagen, wurde das dahinter liegende Objekt nicht entfernt. Als Beispiel sei hier der Volksaltar angeführt:
Der Altar war richtigerweise als unten offener Kubus definiert. Der Boden darunter hätte jedoch nicht vorhanden sein dürfen (vgl. Abb. 41 und Abb. 42).

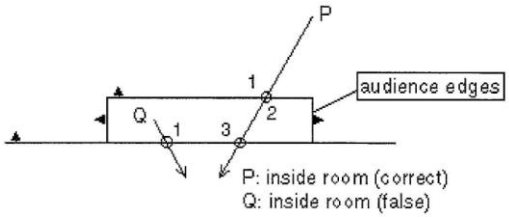


Abb. 41: falsche Zuordnung der Flächen (Quelle: CATT-Manual)

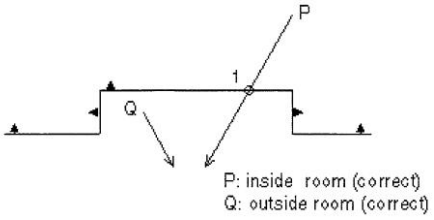


Abb. 42: richtige Zuordnung der Flächen (Quelle: CATT-Manual)

Dieser Umstand wurde behoben und eine weitere Simulationsserie (zweiter Durchgang) wurde gestartet.

Zweiter Durchgang

Im zweiten Durchgang wurden die Streugrade für alle Flächen, konstant mit 90% über das gesamte Frequenzband, definiert. Die Absorptionseigenschaften wurden leicht nachjustiert, sodass sich das Modell bereits in Richtung Nachhallzeitmessergebnis hinentwickelte und nur mehr in Teilbereichen angepasst werden musste (Abb. 47).

Im zweiten Durchgang wurde jedoch ein anderes Problem sichtbar, das im ersten Durchgang aufgrund der Fehler in der Modellierung (doppelt parallele Flächen) weniger aufgefallen ist.
Als Simulationsergebnis werden auch die so genannten „Leak´s“ angezeigt. Wörtlich übersetzt heißt „Leak“ „undichte Stelle“. In der Simulation können es auch nicht auftreffende Schallstrahlen bzw. Strahlablenkungen sein, die als aufsummiertes Gesamtergebnis angezeigt werden (siehe Abb. 43). Sind diese Ablenkungen am Beginn (in den ersten 100 ms) relativ hoch, so sollte das Modell verbessert werden. Gleichzeitig wird angezeigt, wo diese Stellen vorkommen.

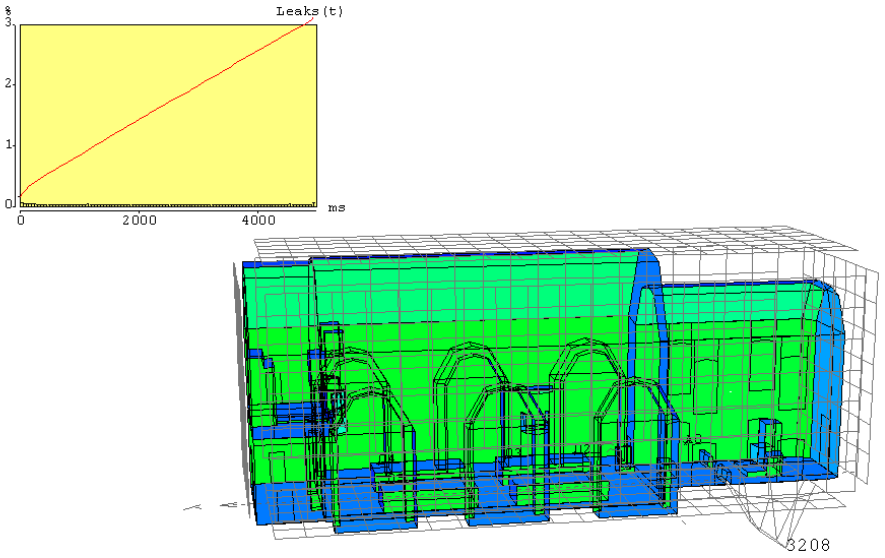


Abb. 43: Leak-Verteilung am Beispiel Simulations-durchgang mit dem Sender A0 (Quelle: CATT-Simulation)

Im vorliegenden Modell der Kirche zeigen sich diese Stellen besonders im Altarraum, speziell im Bereich des Hochaltars, bei der Kanzel und unterhalb der Orgelempore. Wobei die „Leaks“ in Bereichen mit gekrümmten Flächen höher sind als bei den geraden Flächen (Orgelempore). Durch die Steigerung der Absorptionsgrade der jeweiligen Flächen sinkt zwar der Anteil der „verlorenen Strahlen“ ein wenig, die möglichen Fehler bleiben jedoch sichtbar. Nach der weiteren Überarbeitung des Modells wurden noch einige Stellen entdeckt, die nicht sauber modelliert waren. Teilweise gab es einen Sprung im Anschluss (Kanzel) der einen Fläche an die andere, oder es wurden Teilbereiche vergessen zu modellieren. Diese Bereiche (z.B. bei der Orgelempore) erzeugten im Modell einen Hohlraum, in dem sich die Schallstrahlen „verirren“ konnten. Nach Beseitigung aller erkennbaren Problemstellen blieb noch ein Bereich um den Hochaltar über, in dem es zu großen „Strahlverlusten“ kam.

Beim Studium des vereinfachten Modells fiel auf, dass so gut wie keine Schallstrahlen verloren gegangen sind. Grund dafür war, dass es bei den Einbauten (z.B. Altar, Orgel, Kanzel, usw.) keine gekrümmten Flächen gab, die jedoch beim aktuellen Modell vorhanden waren. Da es in CATT nicht möglich, ist eine gekrümmte Fläche zu modellieren wurde diese Fläche aus mehreren Einzelflächen zusammengesetzt.

Beim Fehlerbehebungsversuch wurde der Hochaltar in ein System von wandparallelen Flächen geändert. Aus dem konvexen bzw. konkaven Flächensystem

an der Vorder- und Rückseite wurde eine ebene Fläche. Im darauf folgenden Simulationsdurchgang zeigte sich, analog zum vereinfachten Modell, dass nur mehr ein Strahl verloren ging. Es liegt nun die Vermutung nahe, dass aufgrund von Eigenheiten (z.B. rechentechnische Probleme, zuwenig Rechendurchgänge, o.ä.) im Programm, kein „verlustfreier“ Simulationsdurchgang durchgeführt werden kann (siehe Abb. 44).

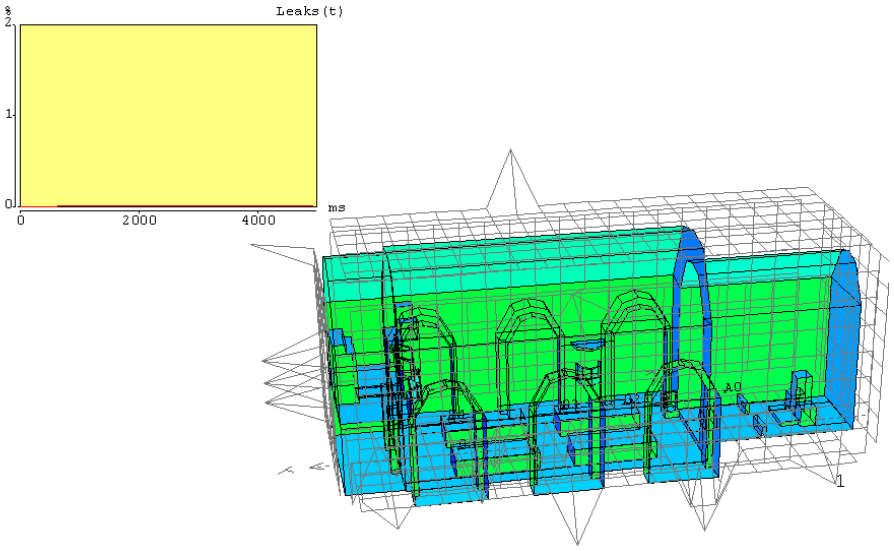


Abb. 44: Leak-Verteilung an der variierten Simulation mit ebenem Hochaltar (Quelle: CATT-Simulation)

In weiterer Folge wurden diese Verlusterscheinungen, die vermutlich zu einer Absorption des Schalls im Bereich des Hochaltars beitragen, untersucht. Die nächste Vermutung die sich aufdrängte, nämlich dass es durch gekrümmte Flächen Schallwellenbündelung bzw. –streuung gäbe, wurde mit Hilfe des Kapitels „Schallausbreitung in Räumen“ [Fas03] untermauert. Hier fand sich, dass zur Lenkung bzw. Weglenkung von Schallwellen zu bestimmten Objekten, konkave bzw. konvexe Reflexionsflächen eingesetzt werden (siehe Abb. 45).

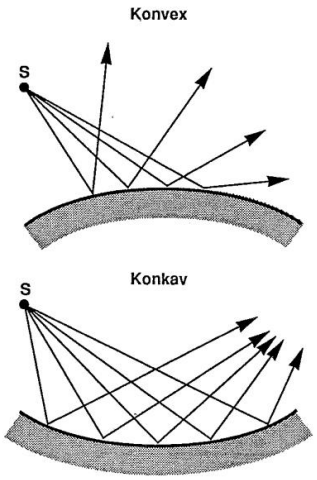


Abb. 45: Reflexionen an konvex und konkav gekrümmten Flächen (Quelle: [Fas03])

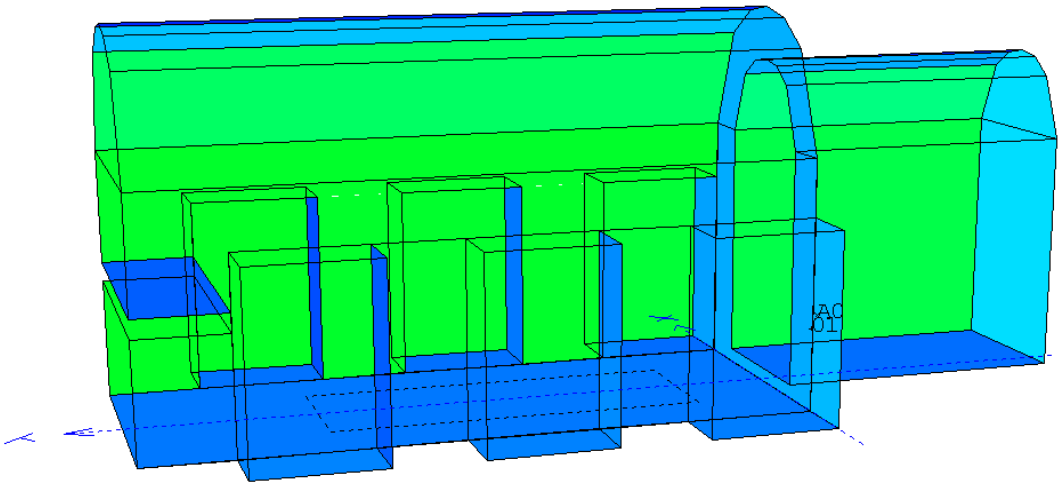


Abb. 46: Simulationsmodell aus 2006 - vereinfachte Modellierung (Quelle: CATT-Simulation)

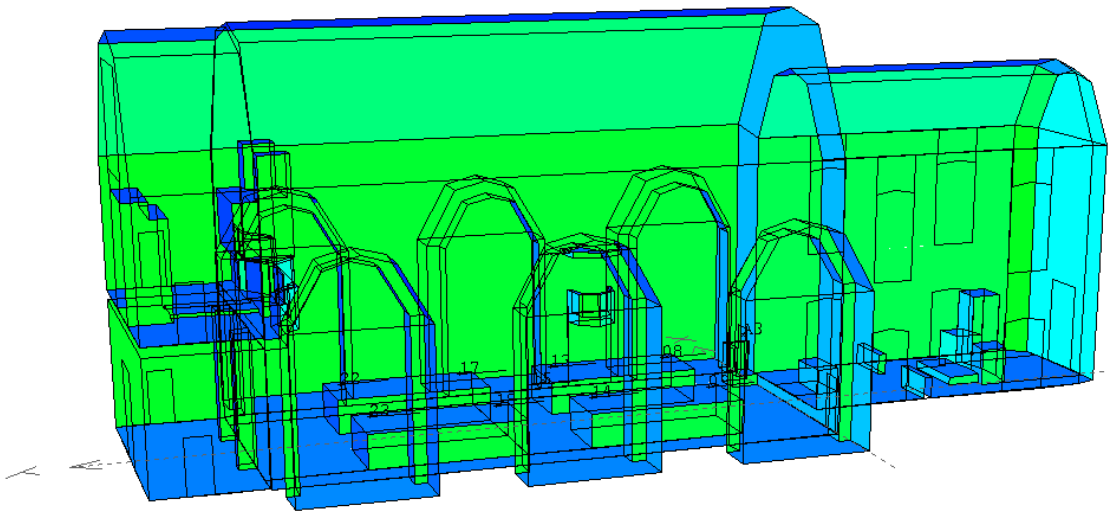


Abb. 47: aktuelles Simulationsmodell - umfangreichere Modellierung (Quelle: CATT-Simulation)

4.2.6 Problematik, Schwierigkeiten

Zusammenfassend sei nochmals auf die Probleme in der Simulation hingewiesen. Eine detaillierte Beschreibung findet sich im Abschnitt „erster Durchgang“ bzw. „zweiten Durchgang“.

Zum Ersten wurde im ersten Durchgang bei der Modellierung übersehen, dass übereinander liegende Flächen, mit Absorptionsgrad behaftet, eine zusätzliche Absorptionsfläche darstellen. Frühestens bei der Betrachtung der Sabine´ schen Nachhallzeit zeigen sich Unregelmäßigkeiten (zu niedrige Werte), da das Volumen gleich bleibt, während die Absorptionsflächen zu groß sind.

Das zweite große Problem waren „undichte“ Stellen im Modell. Während diese zum Großteil durch die Überarbeitung der Geometrie ausgemerzt werden konnten, erwies sich der gekrümmte Bereich des Hochaltares als hartnäckiger Schallstrahlen–„absorber“ trotz „dichten“ Modells. Durch die Variation des Altars zu einem wandparallelen Objekt verschwand auch die absorbierende Wirkung.
In der weiteren Betrachtung wurde dieser Modellfehler in das Modell integriert.

4.2.7 Anpassung an die Nachhallzeit

Im Laufe der Simulationsdurchgänge wurde auch das Modell als Ganzes immer wieder angepasst. Sei es durch Änderung der Absorptionsgrade, sei es im Bereich der Geometrie z.B. durch Ergänzung von Fenstern und Türen, die in den ersten Näherungen weggelassen wurden.
Das die Fenster und Türen relevant waren, zeigte sich in der Phase der Anpassung, als deutlich wurde, dass die Nachhallzeiten in den unteren Frequenzbändern (125 Hz, 250 Hz) zu hoch waren und beispielsweise nicht sinnvoll durch Variation der Einbauteile (Altar, o.ä.) abgesenkt werden konnten. Die Türen und Fenster wirkten von den Absorptionseigenschaften wie Plattenabsorber und trugen dazu bei, dass das Modell schrittweise genauer wurde.

Die eigentliche Anpassung des Modells erfolgte schrittweise. Der erste Schritt war, die vorhandene Geometrie einzugeben und den Flächen Absorptionseigenschaften zuzuweisen. Der nächste Schritt war, das Modell an die Messergebnisse vom Juni 2006 anzugleichen. Im letzten Schritt sollte aus der verbesserten Simulation ein Messprogramm entstehen und das kalibrierte Modell dann auf Plausibilität überprüft werden.

In der Phase der Datenübertragung stellte sich immer wieder die Frage, wie mit jenen Flächen umzugehen ist, die nicht erfassbar, bzw. zu klein oder zu komplex waren. Oder anders gefragt: „Wie bekommt man den barocken Hochaltar mit allen Figuren und Verzierungen in eine ebene Fläche“ (siehe Abb. 48)

Abb. 48: Blick zum Hochaltar – Vergleich Realität u. Modell (Quelle: eigene Darstellung/Modell)

Darauf könnte eine mögliche Antwort sein: „Durch Wahl von geeigneten Absorptionseigenschaften für die Fläche."
Spätestens jetzt kann die Verzweiflung ausbrechen, da es keine Absorptionseigenschaften für genau diesen barocken Hochaltar gibt. Nicht möglich ist es, den Altar abzubauen und die Daten im Labor messtechnisch zu erfassen. Ein anderer Weg wäre das Studium der Literatur. Selbst in Fachbüchern ist kein Wert für einen „barocken Altarraum" zu finden.

Somit ergab sich die Überlegung, den Altarraum in Teilbereichen einzuteilen, für die es Absorptionseigenschaften gibt und diese dann an die Gesamtmessdaten der Vor-Ort-Messungen anzupassen.

Die nächste Frage war, welche Parameter miteinander verglichen und welche Größen verändert werden sollen. Als mögliche Stellgrößen standen nur die Absorptionseigenschaften zur Auswahl, da die Geometrie nach Messungen am Objekt als gesichert angesehen wurde. Auch die Streueigenschaften der einzelnen Flächen wurden im zweiten Schritt konstant mit 90% angesetzt, um eine gleichmäßige Verteilung der Schallstrahlen im Raum zu erreichen. Durch diese Annahme blieb als einzig variable Größe die Absorptionsgrade der einzelnen Flächen übrig. Im vorliegenden Fall waren das 12 verschiedene

Flächeneigenschaften zu je 6 Werten, da die Absorptionseigenschaften in Oktavbändern gegeben waren.

Auf der Seite der Zielgrößen standen 3 Messpunkte, die dann mit den Messpunkten aus dem Simulationsmodell verglichen werden sollten, zu je 7 oder auch mehr Eigenschaften (T-Sab, T-30, T-15, EDT, D50, C80, SPL) die in Oktavbändern (6 Werte) angeführt wurden.

Jene Vergleichsgröße (Zielgröße), die sich innerhalb der 3 Messpunkte am wenigsten ändert, die Akustik eines Raumes zu einem großen Teil beschreibt und von Raumvolumen und Absorptionsflächen abhängig ist, ist die Sabine´sche Nachhallzeit.

Auf der Seite der „Stellgrößen“ (Absorptionseigenschaften) war die Wahl der richtigen „Schrauben“ etwas schwieriger. Alle Werte wurden aus der Literatur übernommen. Die Bandbreite an Variationsmöglichkeiten war bei den Einbauteilen (z.B. Holzkonstruktionen mit Hohlräumen, Oberflächen mit Stuckverzierungen bzw. hölzerne Zierelemente) höher als bei raumbegrenzenden Teilen (z.B. Fliesen, Putz, Türen und Fenster).

Ein Element, das einen relativ starken Einfluss auf das Modell hatte, war die Orgel. Akustisch gesehen handelt es sich um einen Breitbandabsorber (wobei nur die Schaufläche – der Orgelprospekt – laut Literatur als solcher ausgewiesen war). Im Modell von 2006 zeigten sich in diesem Bereich große Abweichungen zu den dazugehörigen Messwerten. Im aktuellen Modell war die Orgel relativ detailliert vorhanden, was sich auch positiv im Vergleich zu den Messwerten von 2006 wieder spiegelte.
Die Prospektflächen wurden als fixe Werte angesehen, während die Holzoberflächen mit Hohlraum (restliche Begrenzungsflächen des Instruments) variierbar gehalten wurden.

4.2.8 Ergebnisse

In der folgenden Tabelle (Tab. 2) und graphischen Darstellung der Anpassung (siehe Abb. 49) kann man die Bearbeitungsschritte bei der Anpassung des Modells an die Vor-Ort-Messungen vom Juni 2006, nachvollziehen. Zur Abb. 49 sei noch angemerkt, dass aus Gründen der besseren Lesbarkeit, das Ordinaten-Darstellungsintervall eher klein gehalten wurde. Das führt zu einer relativ starken Überhöhung, wie sich nach einem kurzen Blick auf die Werte zeigen lässt. Die größte Abweichung z.B. zwischen einfachem Simulationsmodell und Messung beträgt „nur“ 0,7 sec (das entspricht ca. 30%).

Das umfangreichere Modell war schon zu Beginn der Anpassung einen Schritt genauer als das einfachere Modell. Die Anpassung wurde auch deswegen durchgeführt, da die Literaturwerte oft nur einen Anhaltspunkt geben.

Tab. 2: Anpassung des Modells – tabellarisch (Quelle: eig. Darstellung)

Kalibrierung des Simulationsmodells anhand der Messergebnisse von Juni 2006							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
T-Sab. [sec]	2,1	2,3	2,7	2,7	2,5	2	Messergebnis von 2006
T-Sab. [sec]	2,04	2,03	2,1	2,04	1,89	1,6	Simulationsergebnis von 2006
T-Sab. [sec]	2,62	2,47	2,70	2,55	2,17	1,61	Simulationsbeginn 2009
T-Sab. [sec]	2,1	2,29	2,69	2,68	2,51	1,96	Simulationsende 2009

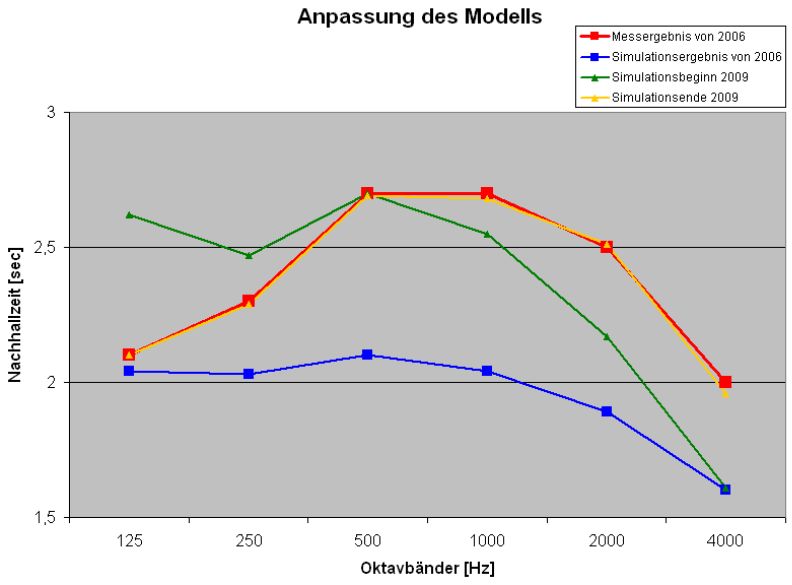


Abb. 49: Anpassung des Modells – graphisch (Quelle: eig. Darstellung)

Die folgende Aufstellung (Tab. 3) zeigt die Schallabsorptionsgrade für alle in der Simulation verwendeten Oberflächen, mit einem Hinweis auf die Herkunft der Werte. Die Werte aus der Quelle [Mey03] stammen zwar zum größten Teil aus Messungen in gotischen deutschen Kirchen. Der Autor verweist jedoch immer wieder auf die verschiedenen Formen von Kirchenbauten. Manche Werte ergeben sich durch die Kombination von zwei verschiedenen Literaturansätzen (siehe Tab. 3).

Tab. 3: Absorptionseigenschaften am Beginn der Anpassung (Quelle: eig. Darstellung)

Zusammenstellung der Eingangsabsorptionsgrade								
Bezeichnung	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Namen / Anmerkungen:	Quelle:
fliesen [%]:	1	1	2	2	2	3	Marmor, Fliesen, Klinker	[Fas03]
audience - a [%]:	3	4	6	20	30	40	"Teppichboden bis etwa 5mm Dicke"	[Fas03]
audience - b [%]:	5	5	5	10	10	15	"Holzgestühl unbesetzt"	[Fas03]
audience [%]:	*5*	*5*	*6*	*20*	*30*	*40*	*Kombination aus "Teppichboden" und "Holzgestühl"*	
kommgi [%]:	10	15	18	20	20	20	"Kirchenbänke (ohne Podest und Polster)"	[Mey03]
putz [%]:	2	3	4	5	6	8	"Kalkzementputz, Tapete, Gipskartonplatten"	[Fas03]
altar [%]:	50	48	43	40	38	31	Ansatzwert aus der Simulation von 2006	
holz [%]:	10	8	6	5	5	5	"Dielen, Parkett, Holzboden hohlliegend (auf Leisten)"	[Fas03]
ranken [%]:	10	15	18	20	20	20	"Kirchenbänke (ohne Podest und Polster)"	[Mey03]
orgel [%]:	53	50	57	62	60	60	"Prospektfläche der Orgel"	[Mey03]
hochalt [%]:	27	25	10	6	6	6	"Holzverkleidung vor Hohlraum"	[Mey03]
holzstr - a [%]:	27	25	10	6	6	6	"Holzverkleidung vor Hohlraum"	[Mey03]
holzstr - b:					plus 7%	plus 10%	"Erhöhung für Stuckverzierungen"	[Mey03]
holzstr [%]:	*27*	*25*	*10*	*6*	*13*	*16*	*Kombination aus "Holzverkleidung" und "Stuckverzierung"*	
holzbo [%]:	15	12	10	7	6	6	"Holzdielen auf Hohlraum"	[Mey03]
fenster [%]:	15	30	18	10	5	5	"Doppelverglasung, innen Blei"	[Mey03]

Im Zuge der Anpassung des Modells wurden (wie bereits in Kap. 4.2.7 beschrieben) die Absorptionsgrade verändert. Um bei der Anpassung nicht wahllos an den diversen Schrauben „zu drehen“, wurde die Veränderung systematisch und in Schrittfolgen durchgeführt. Je nach Absorptionsverhalten der einzelnen Teile wurden die Werte um ein Vielfaches von 5% verändert. Gleichartig wirkende Teile (z.B. verzierte Altaraufbauten, Holzverkleidungen und Holzverzierungen, die eine tiefenabsorbierende Wirkung haben, wurden gemeinsam verändert. Um eine gewisse Plausibilität der Werte zu erhalten, wurde bei der schrittweisen Veränderung immer wieder auf die Literaturwerte geachtet, um keine „Phantasiewerkstoffe“ zu

erzeugen. Das Ende dieser Überlegungen ist in Tab. 4 zu sehen und dient als Vergleich zu den Eingangsgrößen in Tab. 3.

Tab. 4: Absorptionseigenschaften am Ende der Anpassung (Quelle: eig. Darstellung)

Zusammenstellung der korrigierten Absorptionsgrade								
Bezeichnung	**125 Hz**	**250 Hz**	**500 Hz**	**1000 Hz**	**2000 Hz**	**4000 Hz**	Namen / Anmerkung:	Quelle:
audience [%]:	10	15	18	20	20	20	"Kirchenbänke (ohne Podest und Polster)"	[Mey03]
kommgi - a [%]:	1	1	2	2	3	3	"Marmor ohne Hohlraum"	[Mey03]
kommgi - b:					plus 7%	plus 10%	"Erhöhung für Stuckverzierung"	[Mey03]
kommgi [%]:	*1*	*1*	*2*	*6*	*10*	*10*	*Kombination aus "Marmor o. Hohlraum", "Erhöhung" und Anpass.*	
altar - a [%]:	50	48	43	40	38	31	Ansatzwert aus der Simulation von 2006	
altar - b:	plus 15%	plus 2%			minus 15%	minus 25%	Anpassung in den 125, 250, 2000 und 4000 Hz - Oktaven	
altar [%]:	*65*	*50*	*43*	*40*	*23*	*6*	*Kombination aus "Ansatzwert von 2006" und Anpassung*	
ranken - a [%]:	28	10	7	6	6	6	"Holzdecke, glatt und ohne Risse"	[Mey03]
ranken - b:	minus 18%				plus 7%	plus 7%	Anpassung in den 125, 2000 und 4000 Hz - Oktaven	
ranken [%]:	*10*	*10*	*7*	*6*	*13*	*13*	*Kombination aus "Holzdecke, glatt und ohne Risse" und Anpass.*	
hochalt - a [%]:	27	25	10	6	6	6	"Holzverkleidung vor Hohlraum"	[Mey03]
hochalt - b:	plus 10%				plus 1%		Anpassung in den 125 und 2000 Hz - Oktaven	
hochalt [%]:	*37*	*25*	*10*	*6*	*7*	*6*	*Kombination aus "Holzdecke vor Hohlraum" und Anpassung*	
holzstr - a [%]:	27	25	10	6	6	6	"Holzverkleidung vor Hohlraum"	[Mey03]
holzstr - b:	plus 10%			plus 1%	plus 10%	plus 10%	Anpassung in den 125,1000, 2000 und 4000 Hz - Oktaven	
holzstr [%]:	*37*	*25*	*10*	*7*	*16*	*16*	*Kombination aus "Holzverkleidung vor Hohlraum" und Anpassung*	

4.2.9 Vorbereitung des Messprogrammes

Im ersten Arbeitsschritt wurden im angepassten Modell zusätzliche Empfangspositionen gewählt, um ein Netz aus Punkten zur Bewertung und als möglich Messpunkte zu erstellen (siehe Abb. 50).

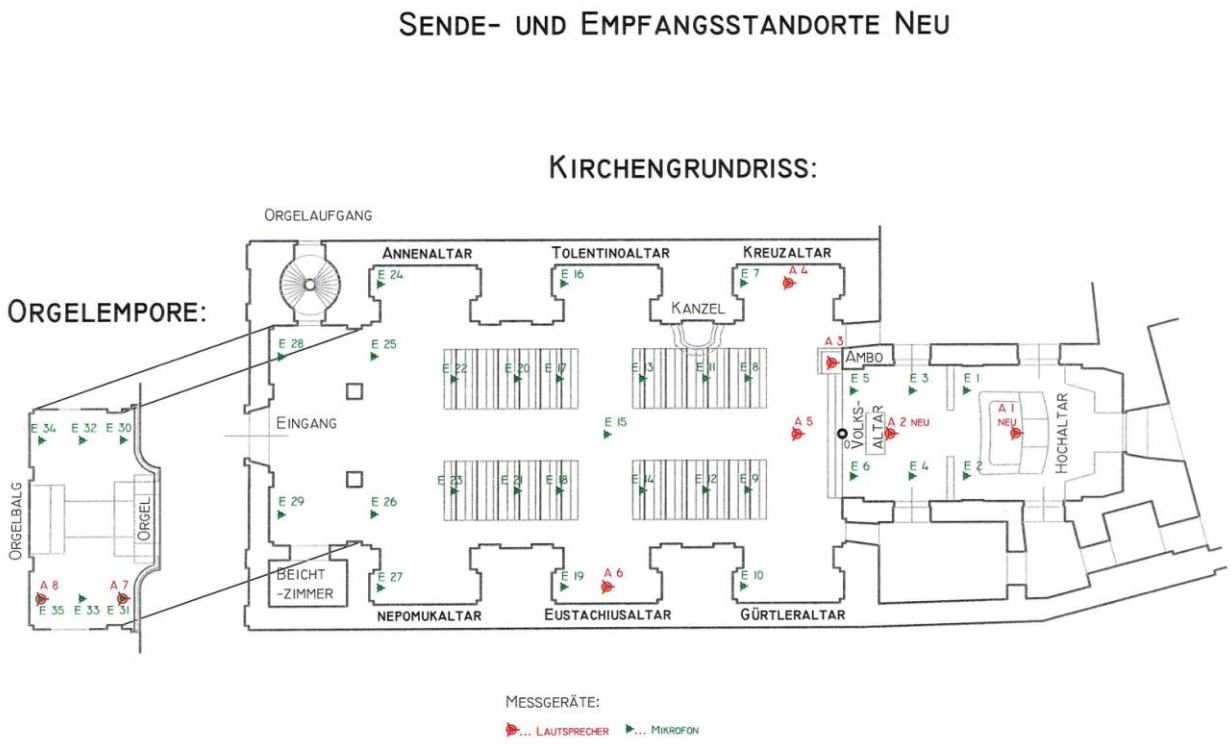


Abb. 50: Für die Berechnung verwendete Messstandorte (Quelle: eig. Darstellung)

Die nun folgenden Überlegungen wurden für alle „alten“ Sende- und Empfangspositionen (A0 bis A2 und E1 bis E5) durchgeführt (siehe Abb. 27). Gleichzeitig wurde nicht nur die Sabine´sche Nachhallzeit (aus T-15 bzw. T-30 hochgerechnet) ermittelt, sondern auch die Anfangsnachhallzeit (EDT). Die Vorgangsweise bei der Bearbeitung wird anhand des Senders A0 exemplarisch gezeigt.

Ein zusätzlicher Simulationsdurchgang mit neuen Empfangsstandorten brachte eine Vielzahl von teilweise sehr knapp beisammen liegenden Nachhallzeitergebnissen (siehe Abb. 51), wobei als Vergleichsgröße die 2006 gemessene Nachhallzeit eingeblendet wurde.

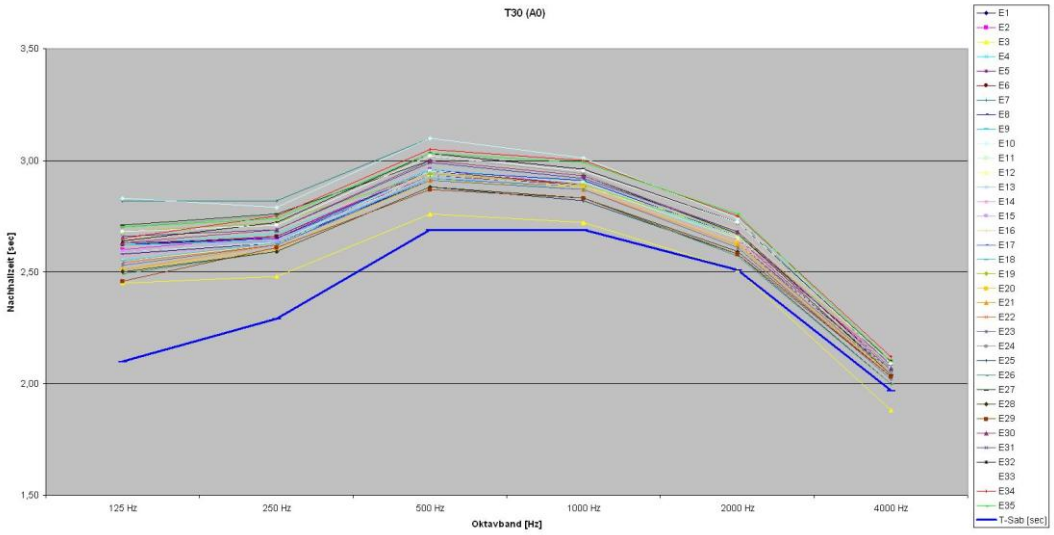


Abb. 51: Sender A0 – Übersicht der Nachhallzeiten (Quelle: eig. Darstellung)

Um aus dem Simulationsergebnis eine Basis für die Auswahl von neuen Messpunkten zu erhalten, wurde folgende Überlegung gemacht. Um möglichst die gesamte Situation des Raumes, ohne mögliche lokale Einflüsse zu erfassen, sollte ein möglicher Messpunkt nur wenig vom Mittelwert abweichen.

Dazu wurde der Mittelwert der Nachhallzeiten von bestimmten Bereichen (Altarraum, Kirchenraum und Orgelempore) errechnet und die Abweichung aller Werte vom jeweiligen Bereichsmittel bestimmt (siehe Tab. 5). Die maximale Abweichung vom Mittel wurde mit 2% angegeben. All jene Punkte, die in allen Oktavbändern weniger als 2% Abweichung hatten, wurden in der Tabelle gelb markiert.

Diese Überlegung wies, wie sich später zeigte, ganz gut auf mögliche Messpunkte hin.

Tab. 5: Sender A0 – tabellarische Übersicht der Nachhallzeiten inkl. Abweichung vom Mittelwert (Quelle: eig. Darstellung)

	Nachhallzeit							graphische Zusammenstellung							
		Sender:	A0								Sender:	A0			
Oktavband	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Oktavband	
T-Sab [sec]	2,1	2,29	2,69	2,69	2,51	1,97	Messung								
							Empfänger							Empfänger	
T-30 [sec]	2,58	2,63	2,91	2,88	2,63	2,06	E1	0,1%	0,2%	0,1%	0,6%	0,1%	1,1%	E1	OK
	2,60	2,66	2,96	2,89	2,65	2,09	E2	0,6%	1,3%	1,7%	1,0%	0,9%	2,6%	E2	> 2%
	2,45	2,48	2,76	2,72	2,51	1,88	E3	5,2%	5,5%	5,2%	5,0%	4,4%	7,7%	E3	> 2%
	2,62	2,67	2,96	2,90	2,65	2,07	E4	1,4%	1,7%	1,7%	1,3%	0,9%	1,6%	E4	OK
	2,63	2,65	2,93	2,89	2,65	2,05	E5	1,8%	1,0%	0,6%	1,0%	0,9%	0,7%	E5	OK
	2,62	2,66	2,95	2,89	2,67	2,07	E6	1,4%	1,3%	1,3%	1,0%	1,6%	1,6%	E6	OK
	2,58	2,63	2,91	2,86	2,63	2,04	Mittel Altar								
	2,82	2,82	3,10	3,01	2,74	2,08	E7	8,8%	6,2%	5,4%	4,2%	3,7%	1,4%	E7	> 2%
	2,62	2,65	2,95	2,91	2,66	2,07	E8	1,1%	0,2%	0,3%	0,7%	0,7%	0,9%	E8	OK
	2,62	2,64	2,95	2,90	2,66	2,07	E9	1,1%	0,5%	0,3%	0,4%	0,7%	0,9%	E9	OK
	2,83	2,79	3,10	3,01	2,74	2,09	E10	9,2%	5,1%	5,4%	4,2%	3,7%	1,9%	E10	> 2%
	2,59	2,63	2,95	2,90	2,66	2,07	E11	0,1%	0,9%	0,3%	0,4%	0,7%	0,9%	E11	OK
	2,55	2,62	2,94	2,89	2,65	2,07	E12	1,6%	1,3%	0,1%	0,0%	0,3%	0,9%	E12	OK
	2,56	2,63	2,93	2,88	2,64	2,05	E13	1,2%	0,9%	0,4%	0,3%	0,1%	0,1%	E13	OK
	2,57	2,62	2,92	2,87	2,64	2,06	E14	0,9%	1,3%	0,8%	0,6%	0,1%	0,4%	E14	OK
	2,59	2,64	2,94	2,88	2,63	2,05	E15	0,1%	0,5%	0,1%	0,3%	0,4%	0,1%	E15	OK
	2,65	2,69	2,94	2,88	2,69	2,10	E16	2,2%	1,3%	0,1%	0,3%	1,8%	2,4%	E16	> 2%
	2,54	2,62	2,92	2,88	2,63	2,04	E17	2,0%	1,3%	0,8%	0,3%	0,4%	0,6%	E17	> 2%
	2,55	2,63	2,92	2,87	2,62	2,04	E18	1,6%	0,9%	0,8%	0,6%	0,8%	0,6%	E18	OK
	2,68	2,72	2,94	2,89	2,67	2,10	E19	3,4%	2,5%	0,1%	0,0%	1,1%	2,4%	E19	> 2%
	2,51	2,60	2,91	2,88	2,63	2,05	E20	3,2%	2,0%	1,1%	0,3%	0,4%	0,1%	E20	> 2%
	2,51	2,62	2,91	2,87	2,62	2,04	E21	3,2%	1,3%	1,1%	0,6%	0,8%	0,6%	E21	> 2%
	2,54	2,62	2,91	2,87	2,61	2,03	E22	2,0%	1,3%	1,1%	0,6%	1,2%	1,0%	E22	> 2%
	2,53	2,62	2,91	2,87	2,61	2,02	E23	2,4%	1,3%	1,1%	0,6%	1,2%	1,5%	E23	> 2%
	2,70	2,75	3,02	2,94	2,67	2,05	E24	4,2%	3,6%	2,6%	1,8%	1,1%	0,1%	E24	> 2%
	2,50	2,59	2,88	2,82	2,58	2,00	E25	3,6%	2,4%	2,1%	2,4%	2,3%	2,5%	E25	> 2%
	2,49	2,59	2,88	2,83	2,57	2,00	E26	3,9%	2,4%	2,1%	2,0%	2,7%	2,5%	E26	> 2%
	2,71	2,76	3,00	2,93	2,67	2,04	E27	4,5%	4,0%	2,0%	1,4%	1,1%	0,6%	E27	> 2%
	2,50	2,59	2,88	2,83	2,59	2,03	E28	3,6%	2,4%	2,1%	2,0%	2,0%	1,0%	E28	> 2%
	2,46	2,61	2,87	2,83	2,58	2,03	E29	5,1%	1,7%	2,5%	2,0%	2,3%	1,0%	E29	> 2%
	2,59	2,65	2,94	2,89	2,64	2,05	Mittel Kirche								
	2,63	2,69	3,00	2,93	2,68	2,07	E30	1,1%	1,0%	0,7%	1,0%	1,4%	1,0%	E30	OK
	2,66	2,69	2,99	2,92	2,68	2,06	E31	0,0%	1,0%	1,0%	1,3%	1,4%	1,4%	E31	OK
	2,64	2,72	3,03	2,96	2,72	2,10	E32	0,8%	0,1%	0,3%	0,1%	0,1%	0,5%	E32	OK
	2,68	2,71	3,02	2,95	2,72	2,09	E33	0,8%	0,2%	0,0%	0,3%	0,1%	0,0%	E33	OK
	2,65	2,75	3,05	3,00	2,75	2,12	E34	0,4%	1,2%	1,0%	1,4%	1,2%	1,4%	E34	OK
	2,70	2,74	3,03	2,99	2,76	2,10	E35	1,5%	0,9%	0,3%	1,1%	1,5%	0,5%	E35	OK
	2,66	2,72	3,02	2,96	2,72	2,09	Mittel Empore								

Noch umfangreichere Ergebnisse, losgelöst von den verwendeten Empfangsstandorten, lieferten akustischen Übersichtskarten („Audience Area Mapping“), die eine flächige Verteilung der Energiekriterien (D 50, C 80, G, Ts, LF, sowie die Abnahme des Schalldruckpegels [SPL]) zeigten. Damit war die vollständige Betrachtung der Situation und eine unvoreingenommene Auswahl der Messpunkte möglich.

Die Bilder (Abb. 52, Abb. 53 und Abb. 54) zeigen die Vorgehensweise exemplarisch für den Messpunkt A0.

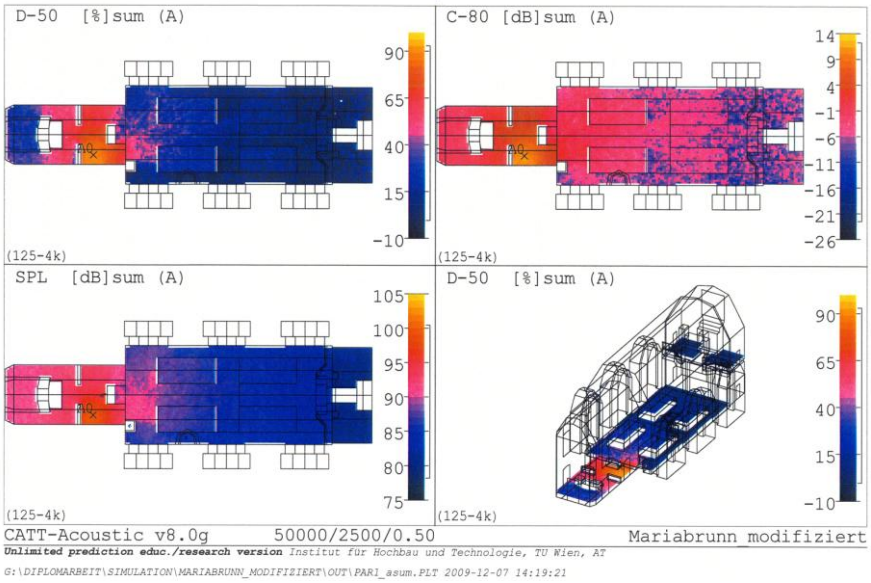


Abb. 52: Sender A0 – Darstellung der Audience Area Map, Teil 1 (Quelle: eig. Darstellung)

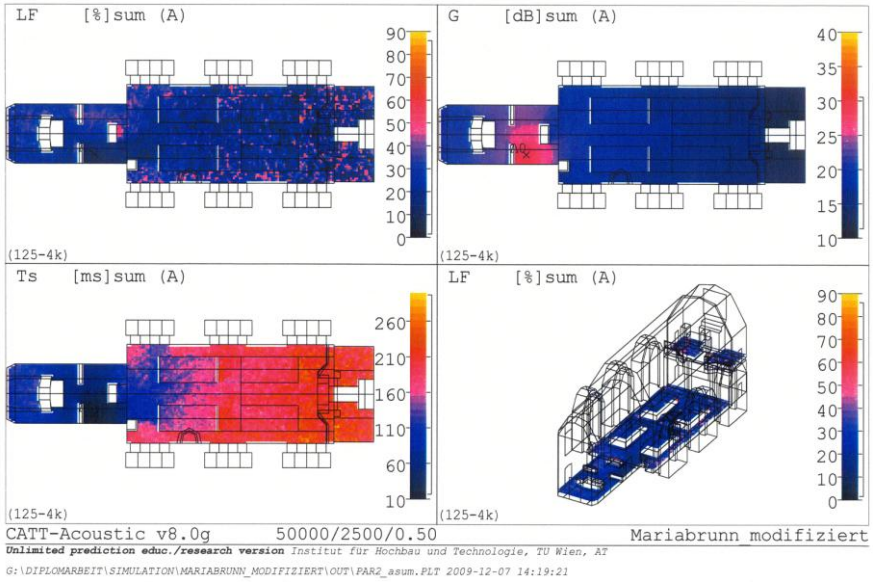


Abb. 53: Sender A0 – Darstellung der Audience Area Map, Teil 2 (Quelle: eig. Darstellung)

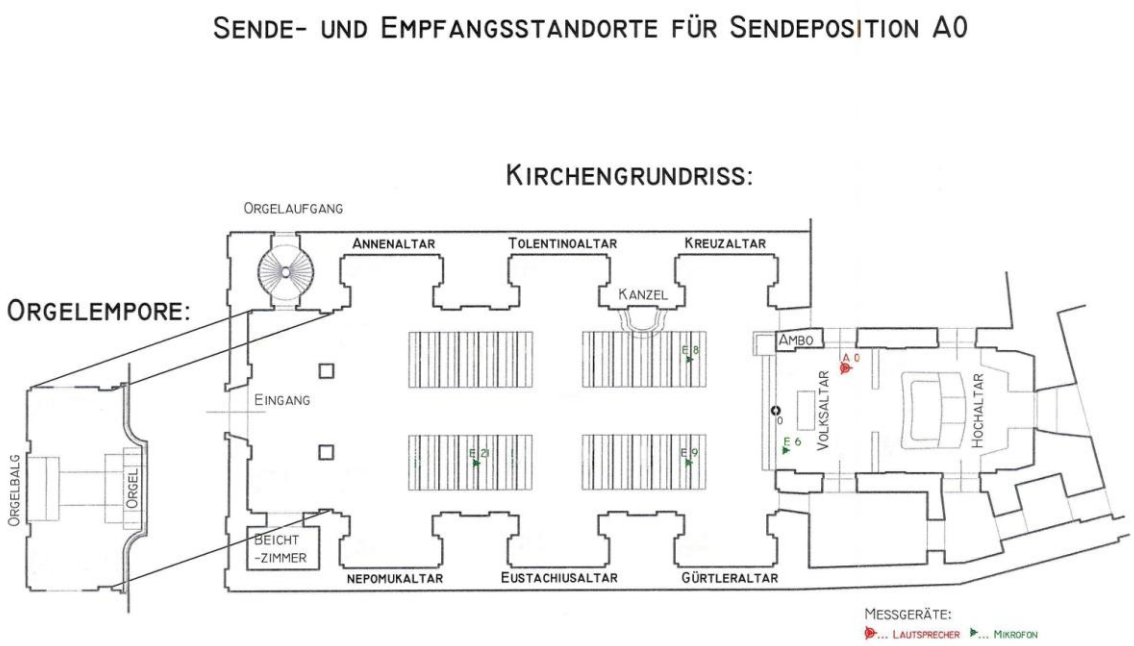
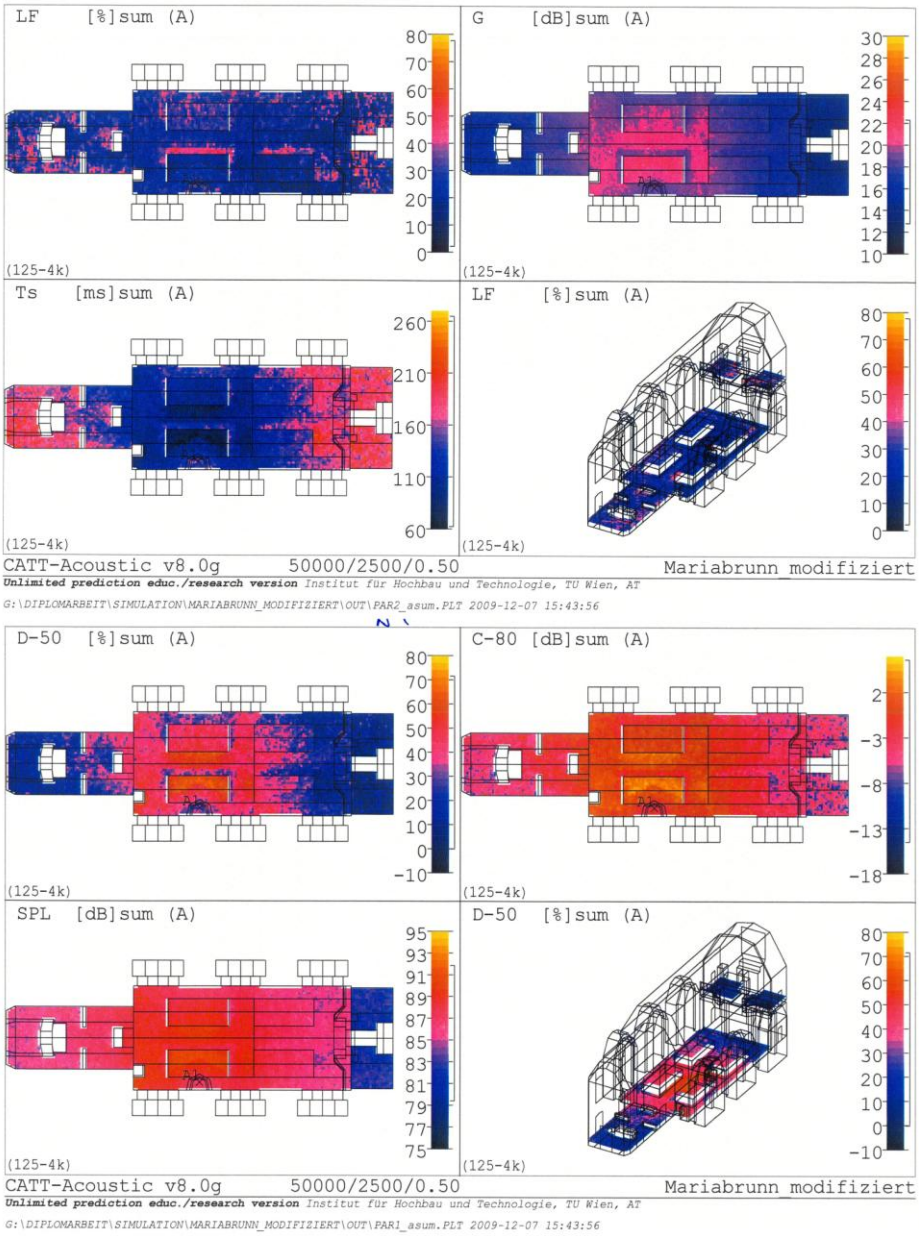


Abb. 54: Sender A0 – Auswahl der Messpunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung)

Um ein möglichst umfangreiches Bild der zu messenden Größen zu erhalten, wurden die Empfangsstandorte so ausgewählt, dass die Punkte gleichmäßig auf Bereiche verteilt waren, die „bessere“ und „schlechtere“ akustische Kennwerte aufwiesen. Im Falle der Deutlichkeit (D 50) waren das Werte größer 50% bzw. kleiner als 50%. Betrachtet wurde auch das Klarheitsmaß (C 80) im Bereich von -1 und +3 dB und die Schalldruckpegelabnahme. Zur Abrundung des Bildes und um die Nachhallzeit auch zu berücksichtigen, wurde die Schwerpunktzeit (Ts), die eine gewisse Analogie zur Nachhallzeit aufweist, mitbetrachtet. Die Grenzwerte orientieren sich an den raumakustischen Optimalwerten (siehe Kap. 2.3.3).

Im Folgenden sind auch die anderen Sendestandorte mit den zughörigen Empfangsstandorten dargestellt (Abb. 55 bis Abb. 61).
Um einen Bezug der Messpunkte untereinander herzustellen und eine Veränderung der gemessenen Werte bei unterschiedlichen Sendepositionen sichtbar zu machen, wurden die gewählten Punkte überlagert (siehe Abb. 67).
Andernfalls hätte man, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleisten zu können, bestimmte Punkte für die Betrachtung der Gesamtsituation auswählen müssen. Damit wäre aber eine sendepunktabhängige, messtechnische Betrachtung der jeweiligen Einzelsituation nicht möglich gewesen.



SENDE- UND EMPFANGSSTANDORTE FÜR SENDEPOSITION A1

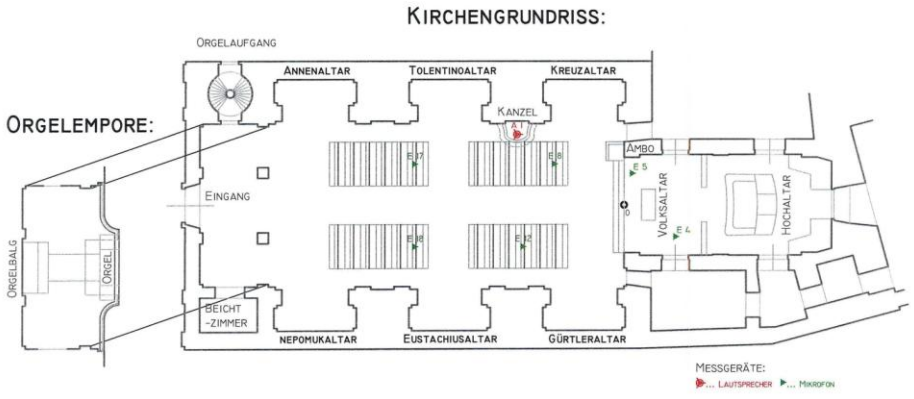
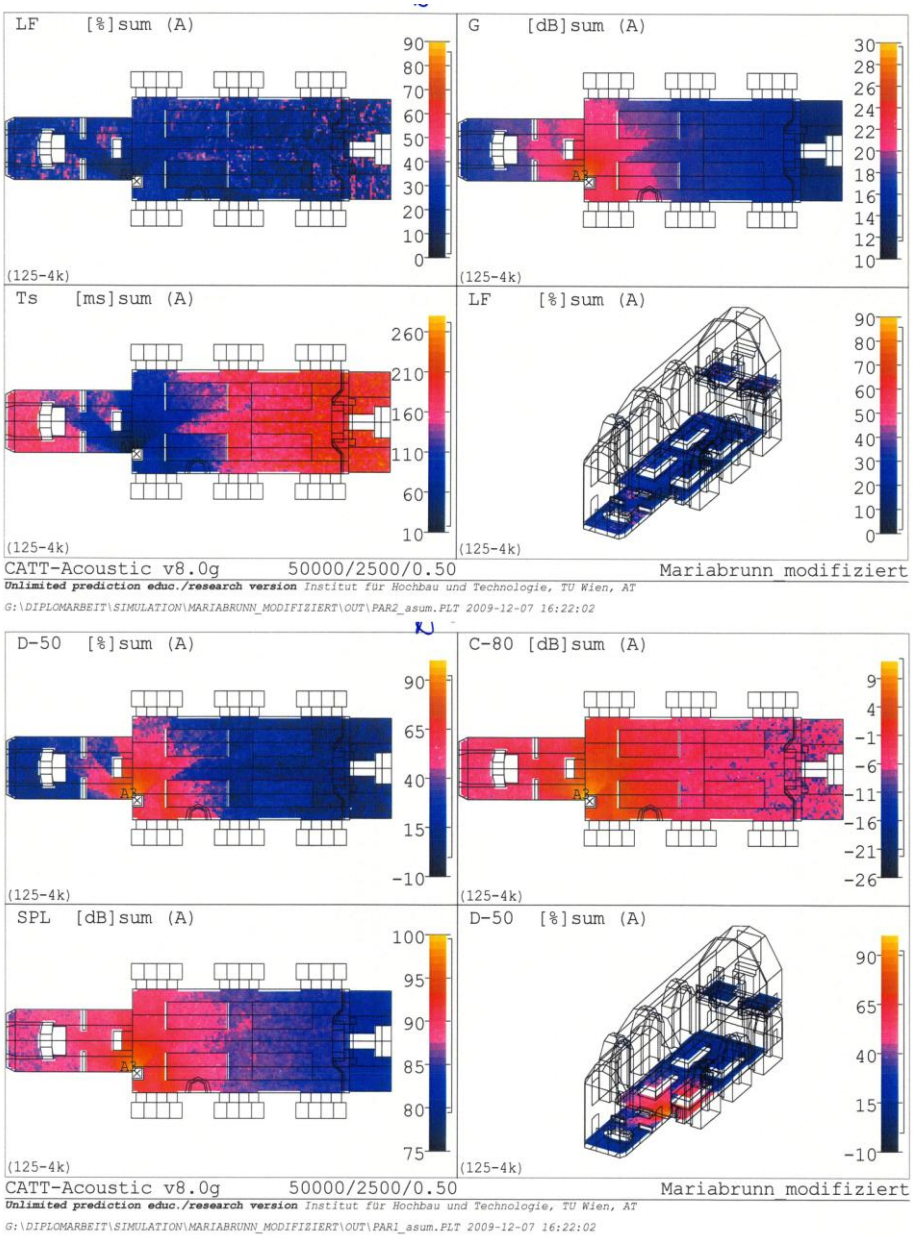


Abb. 55: Erstellen des Messprogramms – Punkt A1 (Quelle: eig. Darstellung)



SENDE- UND EMPFANGSSTANDORTE FÜR SENDEPOSITION A3

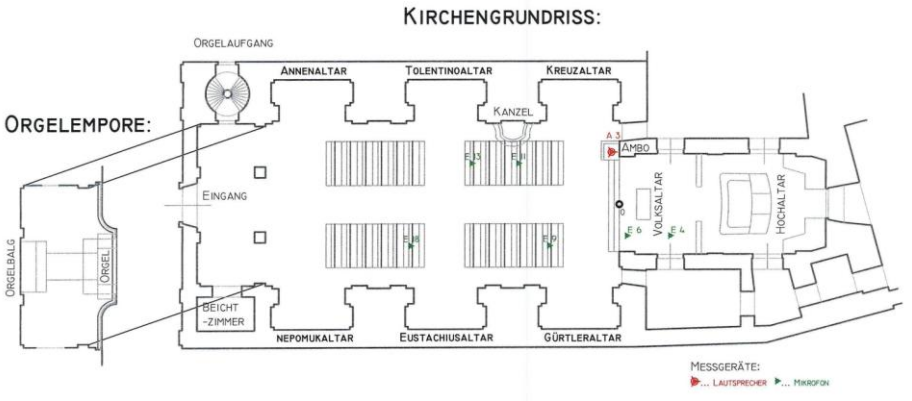
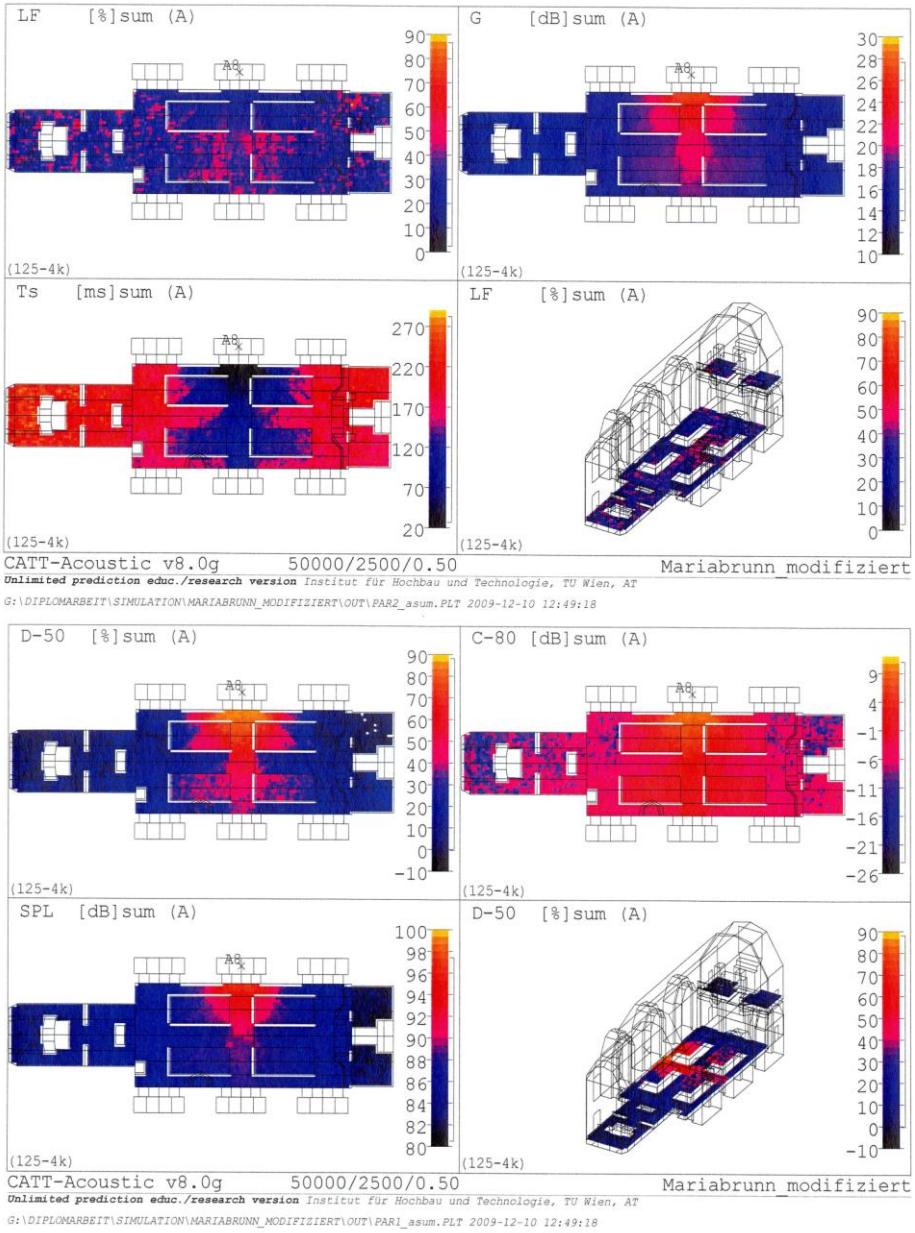


Abb. 56: Erstellen des Messprogramms – Punkt A3 (Quelle: eig. Darstellung)



SENDE- UND EMPFANGSSTANDORTE FÜR SENDEPOSITION A6

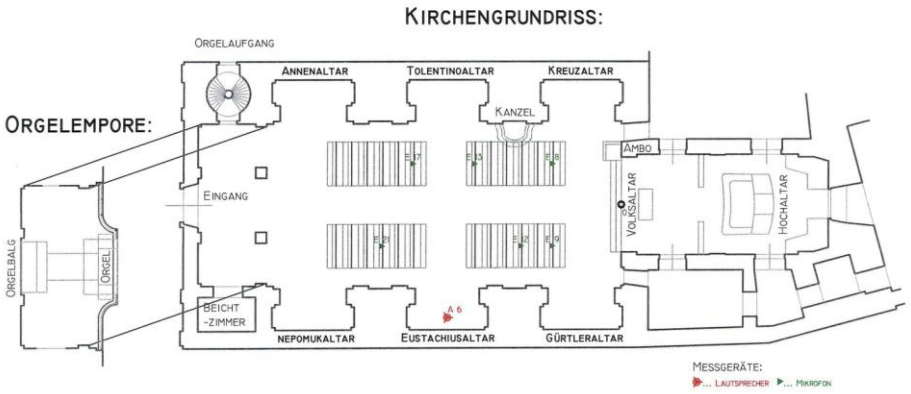
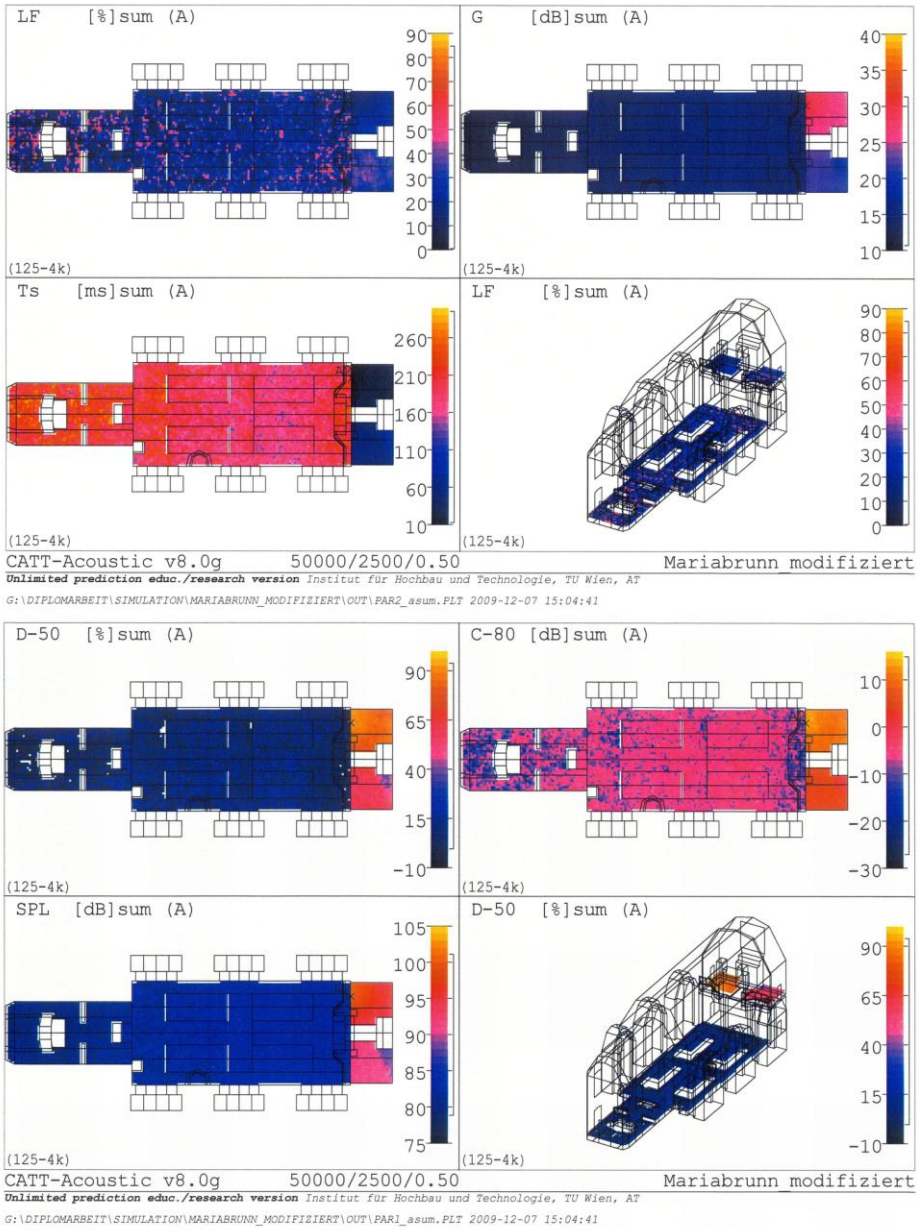


Abb. 57: Erstellen des Messprogramms – Punkt A6 (Quelle: eig. Darstellung)



SENDE- UND EMPFANGSSTANDORTE FÜR SENDEPOSITION A7= A2

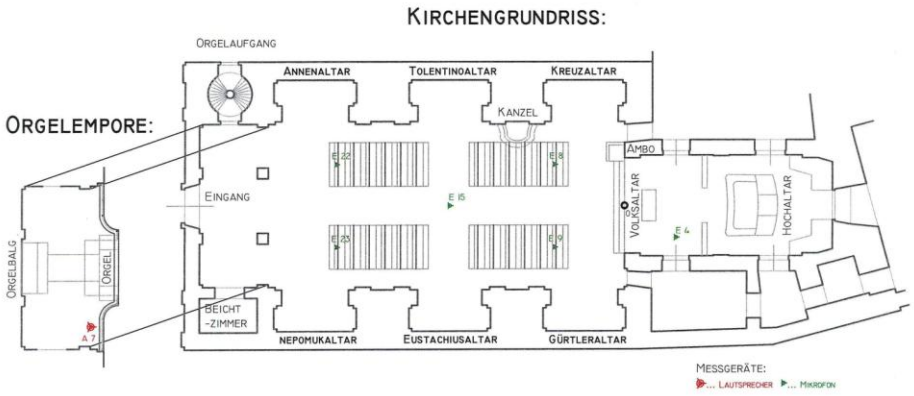
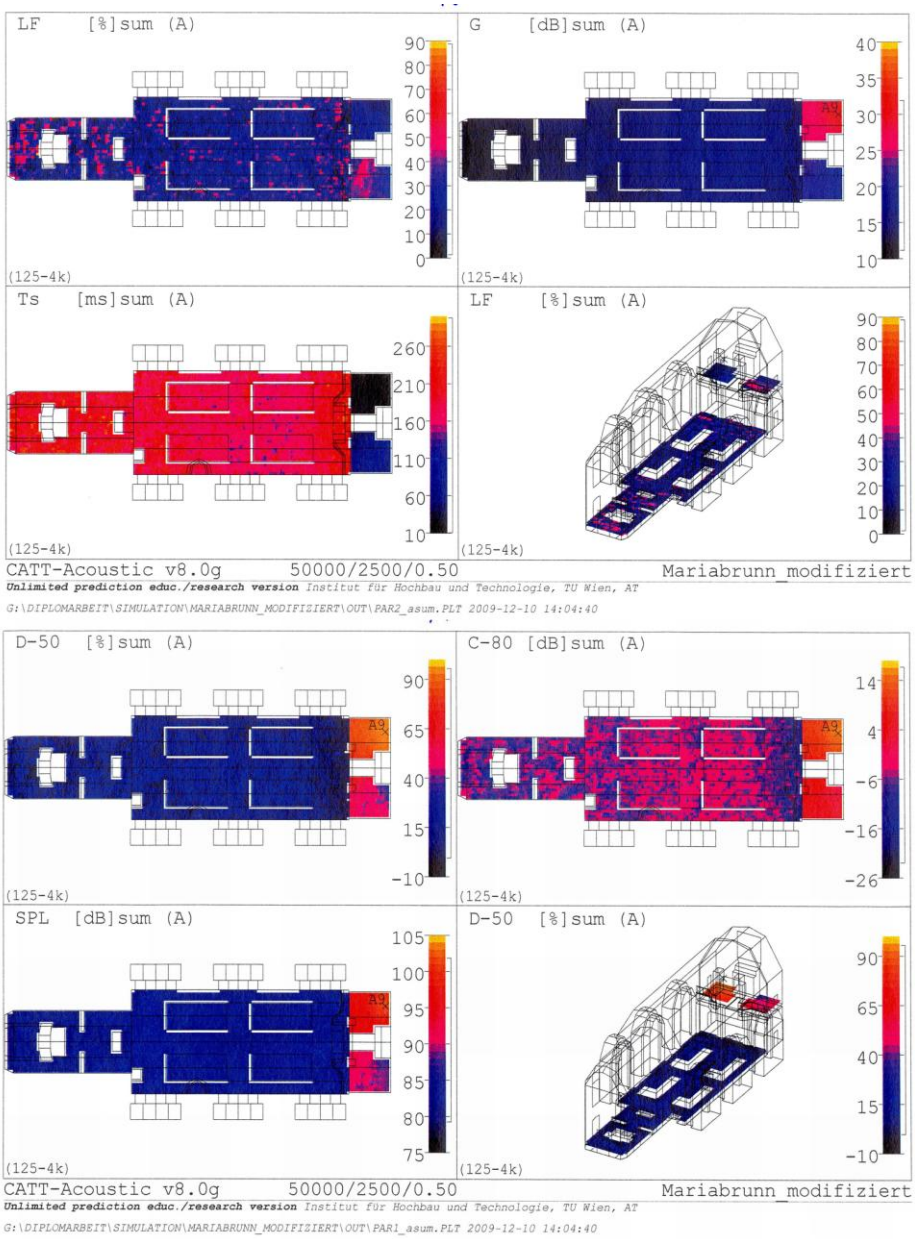


Abb. 58: Erstellen des Messprogramms – Punkt A7 (Quelle: eig. Darstellung)



SENDE- UND EMPFANGSSTANDORTE FÜR SENDEPOSITION A8

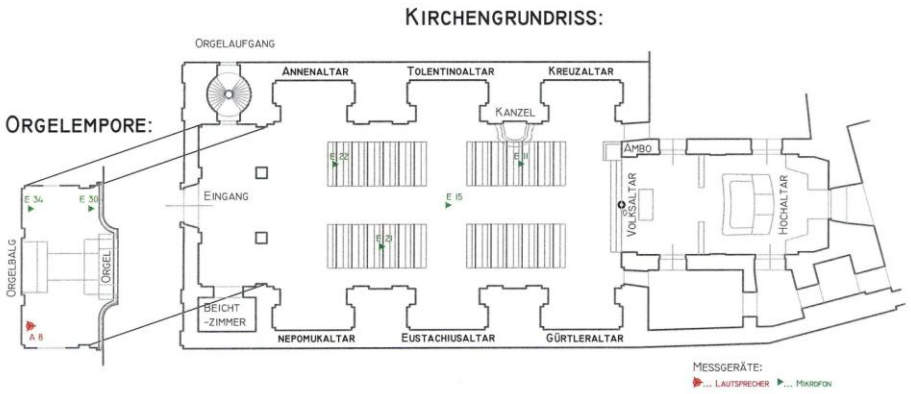
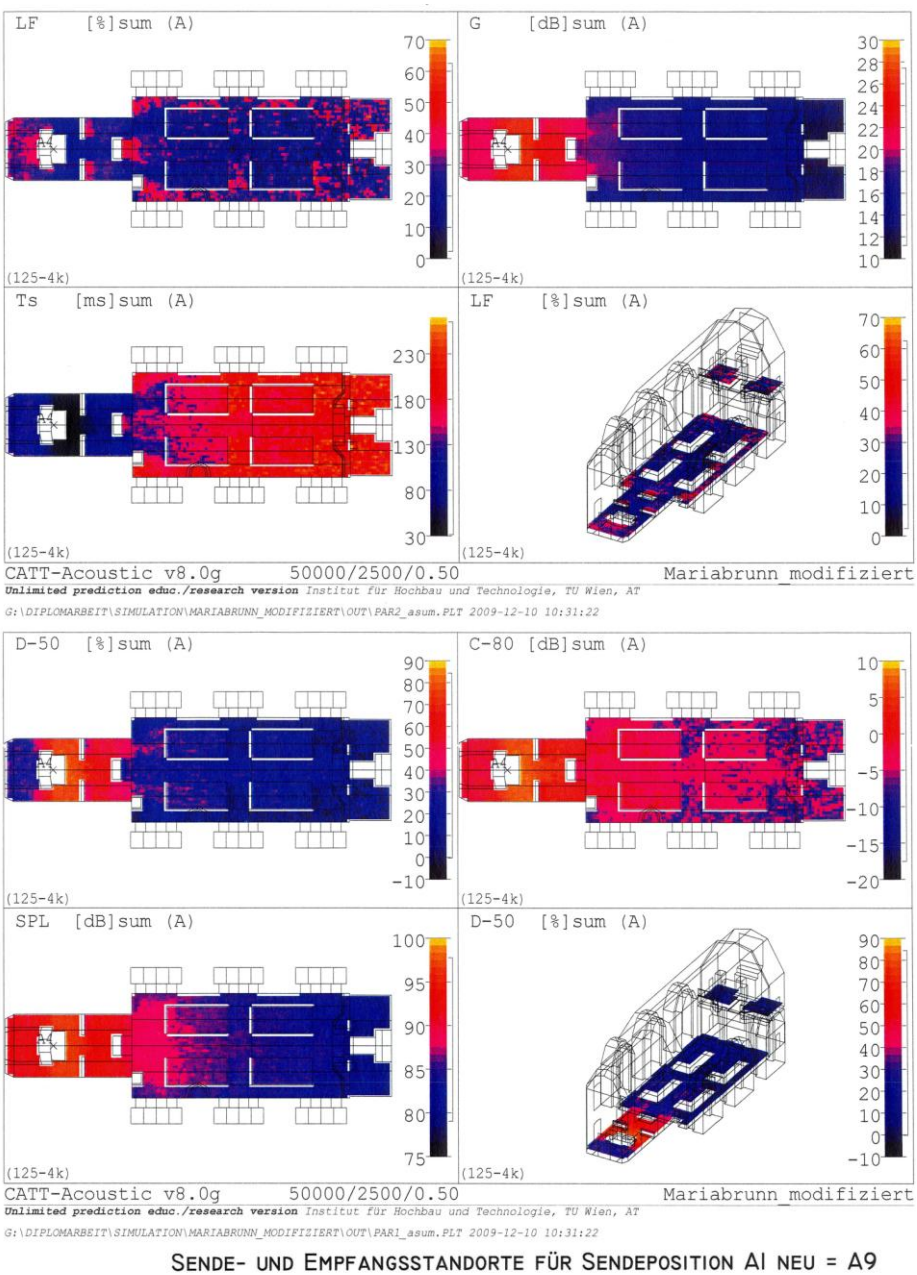


Abb. 59: Erstellen des Messprogramms – Punkt A8 (Quelle: eig. Darstellung)



SENDE- UND EMPFANGSSTANDORTE FÜR SENDEPOSITION AI NEU = A9

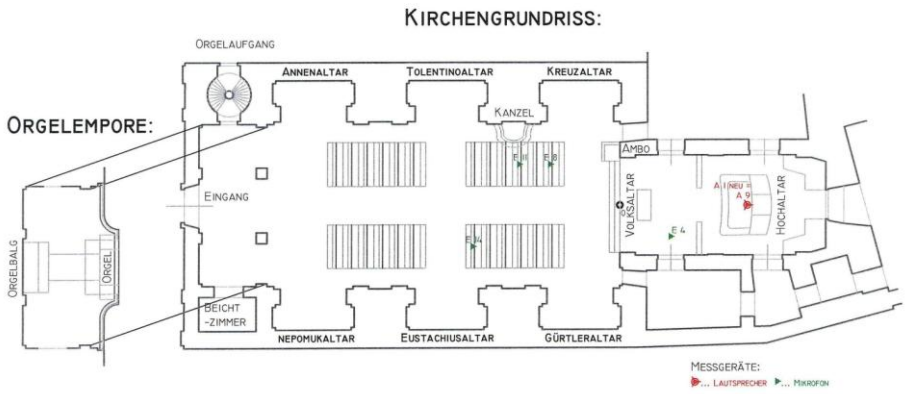


Abb. 60: Erstellen des Messprogramms – Punkt A9 (Quelle: eig. Darstellung)

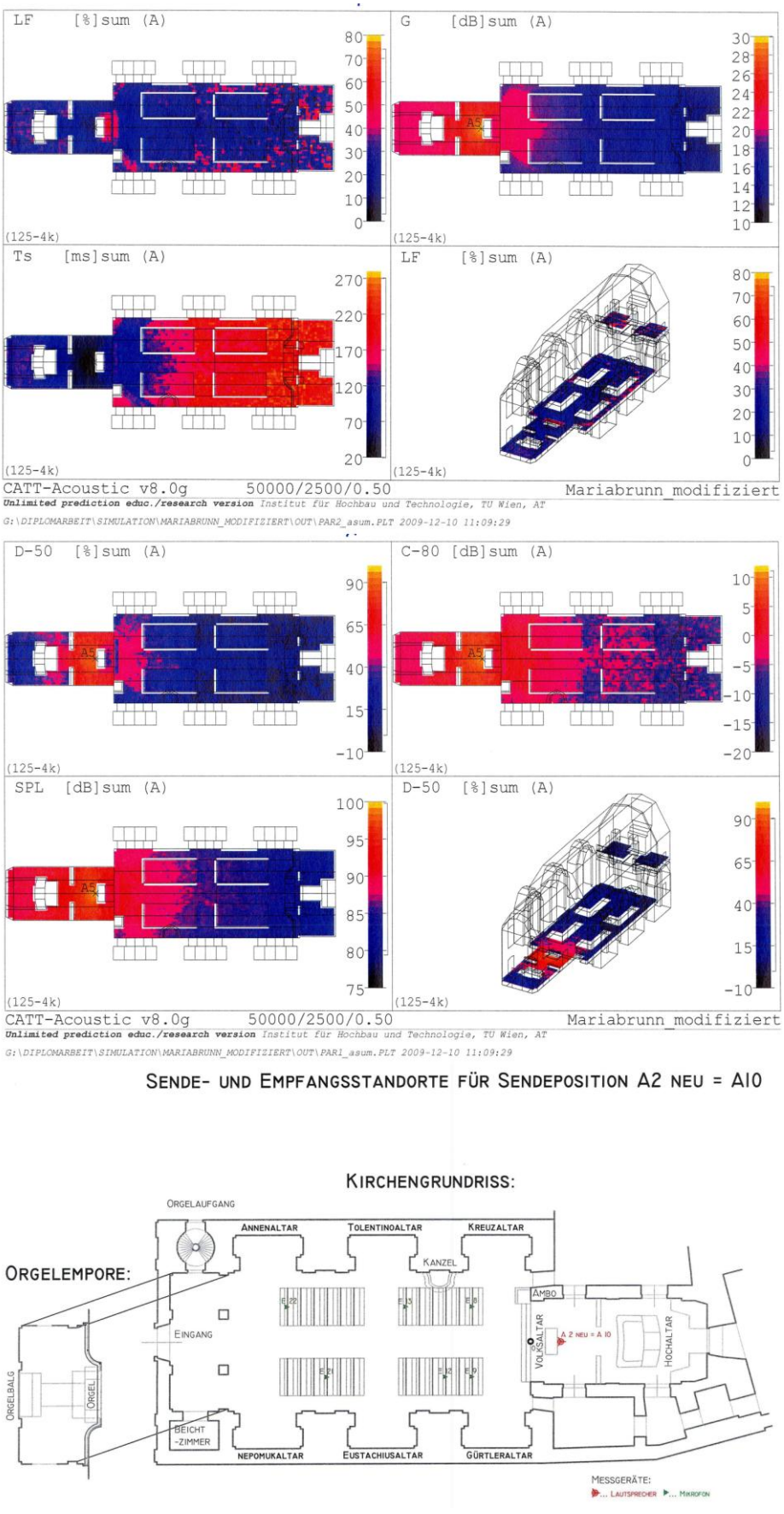


Abb. 61: Erstellen des Messprogramms – Punkt A10 (Quelle: eig. Darstellung)

4.3 Messung vom 29.12.2009

Die Vor-Ort-Messung am Objekt stellt eine, wenn nicht sogar die einzige Möglichkeit dar, ein Objekt in akustischer Hinsicht zu erfassen. Im konkreten Fall ging es darum, die Ergebnisse der Simulation zu vergleichen und gleichzeitig durch ein entsprechendes Netz an Sende- und Empfangspositionen die akustischen Gegebenheiten am Objekt zu erfassen. Auch Laufzeitunterschiede und (eher ungewollte) Schallrückwürfe wurden im Zuge der Messungen sichtbar.

In der Arbeit selbst findet zur Beantwortung der Fragestellung nur der Vergleich der Messergebnisse mit den Simulationsergebnissen bzw. die Bestätigung des Modells, Einzug.

4.3.1 Messgeräte

4.3.1.1 Norsonic RTA 840

Zur Erfassung der Schalldruckpegelverteilung über die Zeit wurde ein Schalldruckpegelmesser mit Mikrofonen und Vorverstärker der Klasse 1 verwendet um die Impulsantworten zu bestimmen (siehe Abb. 62).

Abb. 62: Messung 29.12.09 – Messanlage (Norsonic RTA 840), inkl. Mikrofonen (Quelle: eig. Aufnahme)

Gleichzeitig wurde aus den gemessenen Impulsantworten bereits im Gerät die Nachhallzeit ermittelt. Gemessen wurden die Schalldruckpegel (Kurzzeit L_{eq}) in Zeitschritten von 0,04 sec, in 1/1 Oktavbändern (Oktaven), mit einer Gesamtmesszeit von 6 sec. Der Grundgeräuschpegel und der Maximalpegel wurden je nach Mikrofonstandort verändert. Aufgezeichnet wurden die Pegel in einem Bandmittenfrequenzbereich von 63 bis 8000 Hz, wobei für den Vergleich mit der Simulation nur der Bereich zwischen 125 und 4000 Hz genutzt wird.

Im Gegensatz von reinen Nachhallzeitmessungen wo die Schallanregung mittels rosa bzw. weißen Rauschen aus einem Lautsprecher bewerkstelligt wird und die Nachhallzeit bereits direkt am Gerät ausgegeben wird, wurde im vorliegenden Fall die Impulsantwort als Verteilung der Schalldruckpegel über die Zeit aufgezeichnet. Die Schallanregung erfolgte mittels Punktschallquelle. Ausgelöst wurde die Messung durch einen Messtrigger, der ab einem gewissen Schalldruckpegel (z.B. nach einer Anregung durch die Schallquelle) die Messung startet. Zusätzlich wurden auch die Pegel vor dem Impuls aufgezeichnet (Pre-Trigger).
Die Auswertung der Schalldruckpegelverteilung wurde über eine Hilfs-Datei in eine Microsoft-Excel-Tabelle übertragen.

4.3.1.2 Mikrofone

Abb. 63: Messung 29.12.09 – Mikrofon inkl. Vorverstärker und Kabel am Stativ (Quelle: eig. Aufnahme)

Bei den beiden Mikrofonen handelt es sich um je ein Kondensatormikrofon mit entsprechendem Vorverstärker (siehe Abb. 63). Die Richtcharakteristik der Mikrofone ist eine Kugel, um alle einfallenden Schallanteile gleichartig aufnehmen zu können.

4.3.1.3 Kalibrierung

Um die Genauigkeit der Messungen zu gewähren, sind die Mikrofone sowie die Anlage geeicht. Diese Notwendigkeit ergibt sich, wenn die Messausrüstung für die Messung von Absolutwerten eingesetzt wird. Bei der Messung von Relativwerten (z.B. Pegelabnahme, oder auch Nachhallzeiten) wäre die Eichung des gesamten Messaufbaus nicht notwendig.
Um z.B. die Temperatur oder andere Einflüsse herauszufiltern ist es notwendig, die Mikrofone (und in weiterer Folge die gesamte Messkette) vor und nach jeder Messung zu kalibrieren.
Mittels Kalibrator (auch Pistophon genannt) wird ein definierter Ton in einem definierten Schalldruckpegel erzeugt. Das Gerät wird über das angeschlossene

Mikrofon gehalten und der Pegel abgelesen. Da die Kalibriereinrichtung genau über das Mikrofon passt, kann in jedem Raum und im Freien jederzeit eine ungestörte Pegelmessung durchgeführt werden (siehe Abb. 64).

Abb. 64: Messung 29.12.09 – Kalibrieren der Mikrofone (Quelle: eig. Aufnahme)

4.3.2 Schallquelle

Als Schallquelle wurden handelsübliche Feuerwerks-Knallkörper, allgemein auch als „Schweizerkracher“ bekannt, eingesetzt. Um die Anregung vor allem in den tiefen Frequenzen zu verbessern, wurden sie in einer Stahlkugel gezündet (siehe Abb. 65).

Abb. 65: Punktschallquelle des Forschungsbereichs Bauphysik und Schallschutz (Quelle: eig. Aufnahme)

In der Literatur werden verschiedene Arten von Punktschallquellen aufgezählt. Bei Reichardt [Rei79] werden elektrische Funkenstrecken angeführt, an denen es aufgrund des Spannungsüberschlages zu einem Knall kommt, die sicher zu den bewährteren Methoden zählen.

Bei Fasold [Fas03] werden Pistolenknall, o.ä. angeführt, aber auch auf nichtimpulsive Anregungsgeräusche (Gleittöne, sog. „Tone Sweeps“) wird verwiesen.

Letztendlich zählt die Brauchbarkeit der Messergebnisse und so wird es im Bereich der nicht nach Prüfnorm durchgeführten Untersuchungen immer wieder Verbesserungsansätze für die Punktschallquellen geben.

4.3.3 Zu bestimmende Größen

Bestimmt wurde die Impulsantwort als Schalldruckpegelverteilung über die Messzeit (siehe Abb. 66). Daraus kann die Nachhallzeit (EDT, T-15, T-30, T-Sab) direkt vom Messgerät abgelesen oder umgerechnet werden.

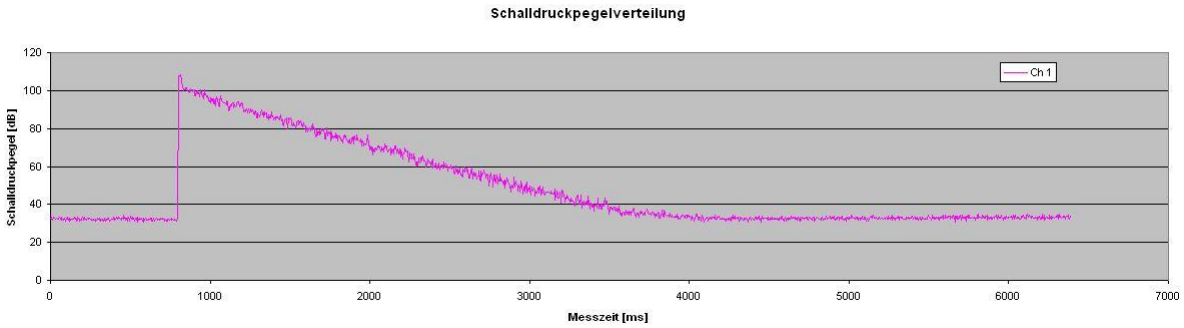


Abb. 66: Beispieldiagramm für eine gemessene Impulsantwort (Quelle: eig. Darstellung)

Aus der Impulsantwort, lassen sich ergänzend zur Nachhallzeit die Energiekriterien ermitteln. Je nach gesuchter Größe lässt sich die Deutlichkeit (D50), das Klarheitsmaß (C80), die Abnahme des Schalldruckpegels (ΔL) mittels Berechnung des Verhältnisses von „nützlicher“ und „schädlicher“ Energie berechnen (siehe Kap. 2.3.2, Energiekriterien).

4.3.4 Messaufbau

Im Kapitel 4.2.9 wurde exemplarisch für einen Sendestandort beschrieben, wie die 4 bis 6 Empfangsstandorte zustande kamen. Die folgende Abbildung (Abb. 67) zeigt die Überlagerung aller zu betrachtenden Empfangsstandorte. Es entstand ein Messraster im Bereich der Zuhörerplätze sowohl in den Bänken als auch im Altarraum. Die beiden Empfangsstandorte auf der Orgelempore ergaben sich bei der Auswahl der Empfangsstandorte für die Punkte A8 bzw. A7. Bei den restlichen Messstandorten dienen sie als Referenzpunkte.

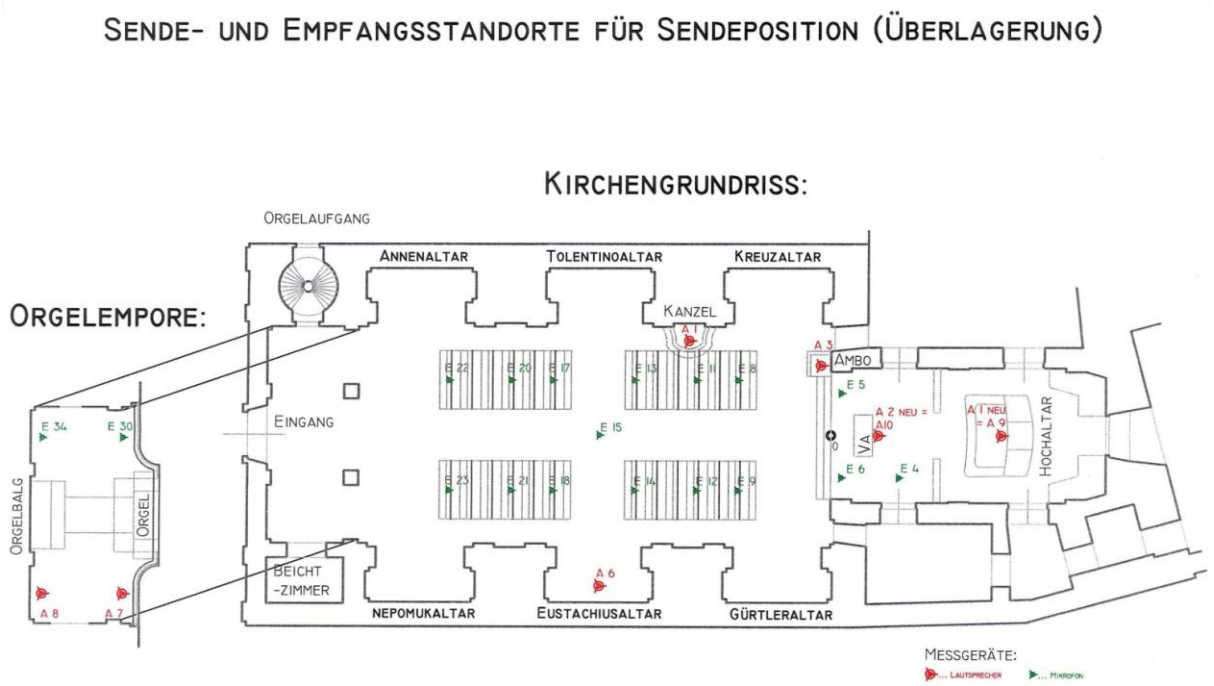


Abb. 67: Messung 29.12.09 – alle Messpunkte (Quelle: eig. Darstellung)

Die nun folgende Abbildung (Abb. 68) zeigt einen Ausschnitt aus dem Messprotokoll. Es sind die Empfangsstandorte für den Sender „A10“ zu sehen. Gleichzeitig sind händische Notizen („Nummern, Hackerl, Ergänzung“) zu den Punkten hinzugefügt. Diese Mitschrift wurde verwendet, um bei der Messarbeit den Überblick über die schon erledigten Messpunkte, die Zuordnung von Messpunkt und Messkanalnummer, sowie die Übertragung der Messdaten in die Nachhallzeitermittlung, zu behalten. Zum Schluss wurde bei der Messdatenübertragung kontrolliert, ob alle Daten verarbeitet wurden.

Messprogramm Kirche Mariabrunn 29.12.09

Bezeichnung	Sender	Empfänger	gem: Impulsantw.	Nachhallzeit
"A10"	A10	E4		
		E5		
		E6		
		E8		
		E9		
		E11		
		E12		
		E13		
		E14		
		E15		
		E17		
		E18		
		E20		
		E21		
		E22		
		E23		
		E30		
		E34		

Abb. 68: Messung 29.12.09 – Messprotokoll (Quelle: eig. Darstellung)

Insgesamt wurden 18 Empfangsstandorte bei 7 Sendepositionen betrachtet. Zum Zeitpunkt der Messungen am 29. Dezember stand in der Kirche ein Christbaum, der bei der Simulation nicht berücksichtigt wurde. Wie groß der Einfluss des Christbaumes auf die äquivalente Schallabsorptionsfläche ist, kann nicht angegeben werden. Für die laufenden Betrachtungen wird der Baum als für die Schallabsorptionseigenschaften unwirksam angesehen und kann Gegenstand weiterführender Überlegungen werden.

Für die Messungen wurde auf dem Sendestandort (hier A3) die Kugel für die Schallquelle (linker Pfeil in Abb. 69) aufgestellt. Die beiden Mikrofone (Kanal 1 und 2) wanderten von Empfangsstandort zu Empfangsstandort. (hier zu sehen ist der mittlere Pfeil in Abb. 69 auf den Messpunkt E11 zeigend). Aufgezeichnet wurden die Schalldruckpegel im Messgerät RTA 840 (zu sehen in Abb. 69, rechter Pfeil).

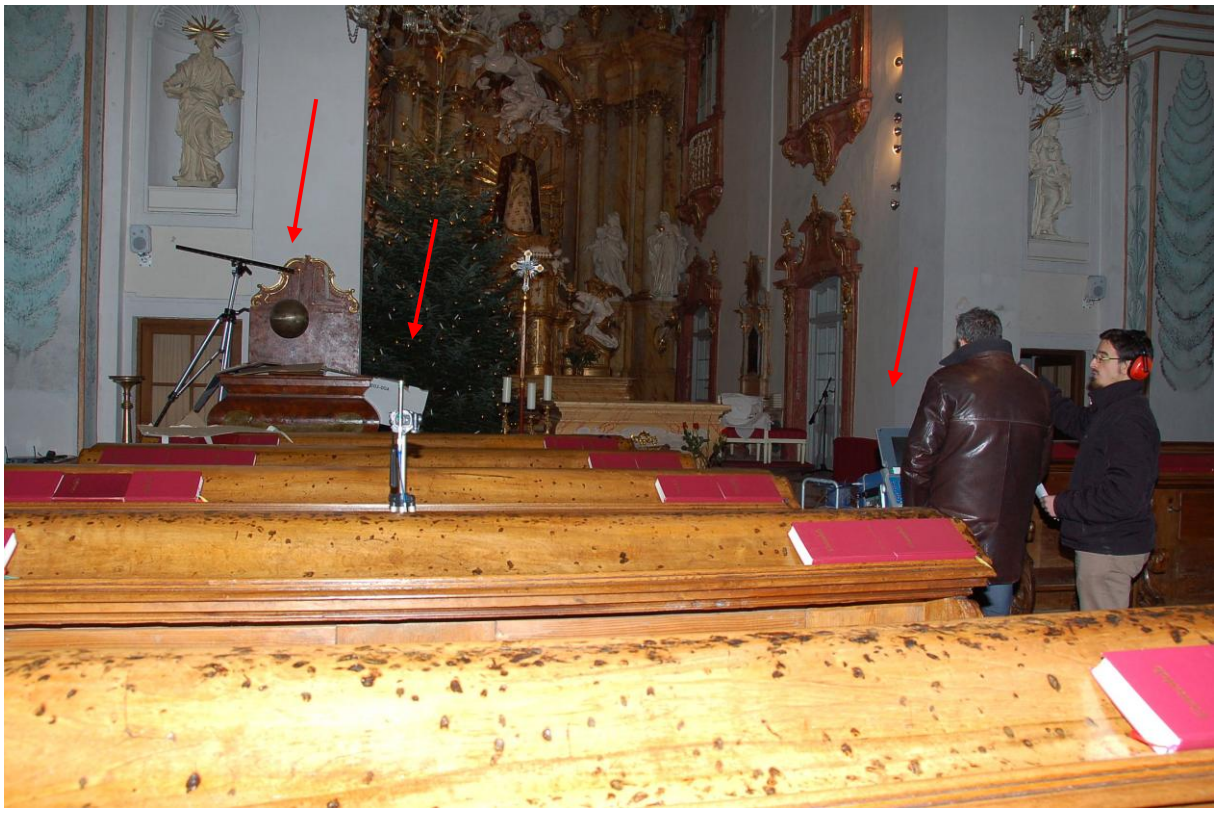


Abb. 69: Messung 29.12.09 – Aufbau der Geräte (Quelle: eig. Aufnahme)

4.3.5 Messergebnisse

Die nachfolgenden Abbildungen (Abb. 70 bis Abb. 75) zeigen einen Querschnitt der Messergebnisse. Aufgrund der Fülle von Daten (7 Sendepositionen mal 18 Empfangsstandorte mal 6 Oktavbandwerte) wurden einerseits nur gewisse Parameter (Nachhallzeit und Deutlichkeit) und andererseits nur bestimmte Sende- und Empfangspositionen dargestellt. Die Einschränkung auf nur zwei Parameter wurde deswegen gewählt, da die beiden Parameter die Situation recht gut abbilden und für den Vergleich zwischen Messung und Modell ausreichen. Die Nachhallzeit spiegelt die Absorption im gesamten Raum wieder, während die Deutlichkeit Aufschluss auf die Wahrnehmung der Schallausbreitung bei den einzelnen Zuhörerplätzen geben kann.

Als Ergebniswerte für die Sendepositionen wurden die Punkte A1 (Kanzel), A3 (Ambo) und A10 (Volksaltar) gewählt. Für die Empfangsstandorte waren es die Punkte E4 und E6 (Altarraum), E8 und E9 (vorderer Bankblock beim Altar) und E22 und E23 (hinterer Bankblock beim Ausgang).
Für die Nachhallzeit wurden nur die Punkte im Altarraum und beim Ausgang gewählt, da sich diese Größe viel gleichmäßiger verhält.
Um die Punkte im Raum auffinden zu können, sei auf die Darstellung aller Sende- und Empfangspositionen (Abb. 67) verwiesen.
In die graphische Darstellung der Ergebnisse wurden auch die Simulationsergebnisse des an die Sabine´sche Nachhallzeit angepassten Modells eingearbeitet um eine direkten Vergleichsmöglichkeit zu schaffen.

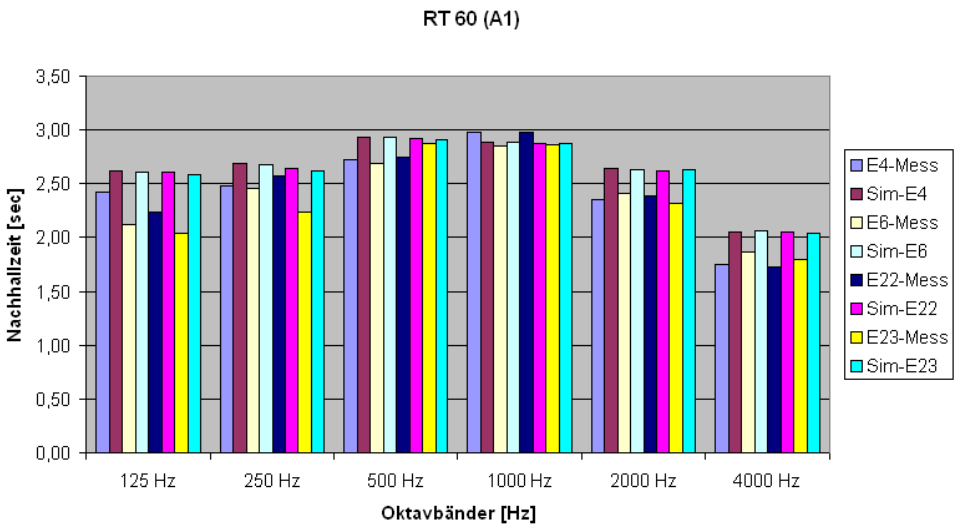


Abb. 70: Mess- und Simulationsergebnis 2009 – Punkt A1, Nachhallzeit (Quelle: eig. Darstellung)

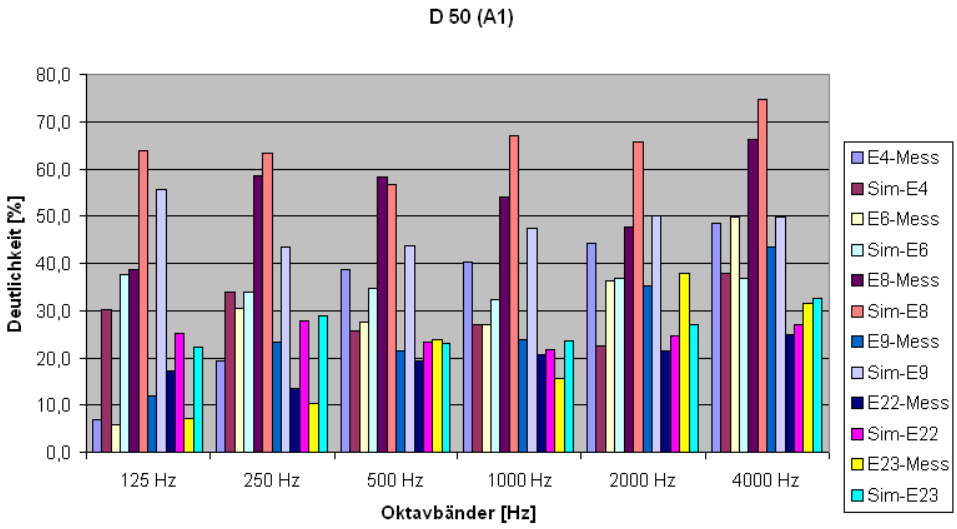


Abb. 71: Mess- und Simulationsergebnis 2009 – Punkt A1, Deutlichkeit (Quelle: eig. Darstellung)

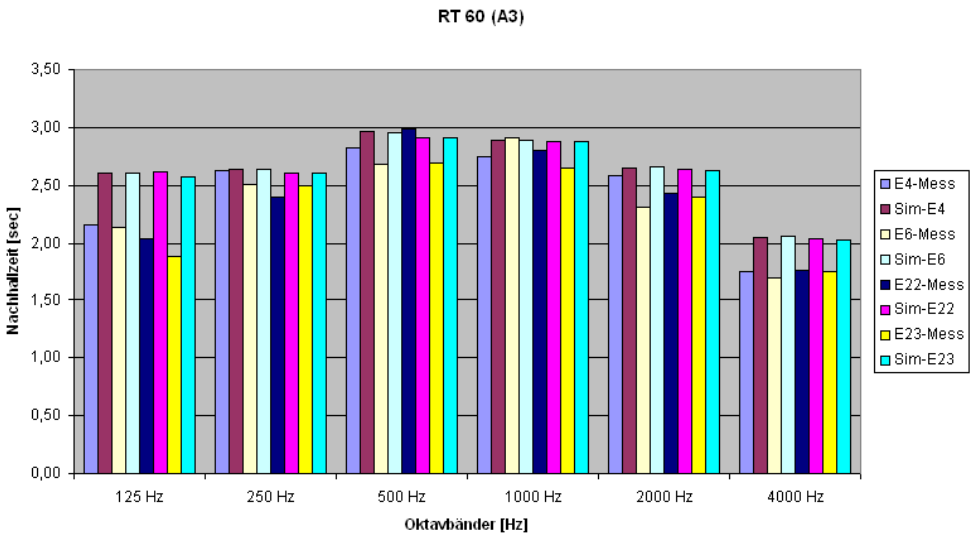


Abb. 72: Mess- und Simulationsergebnis 2009 – Punkt A3, Nachhallzeit (Quelle: eig. Darstellung)

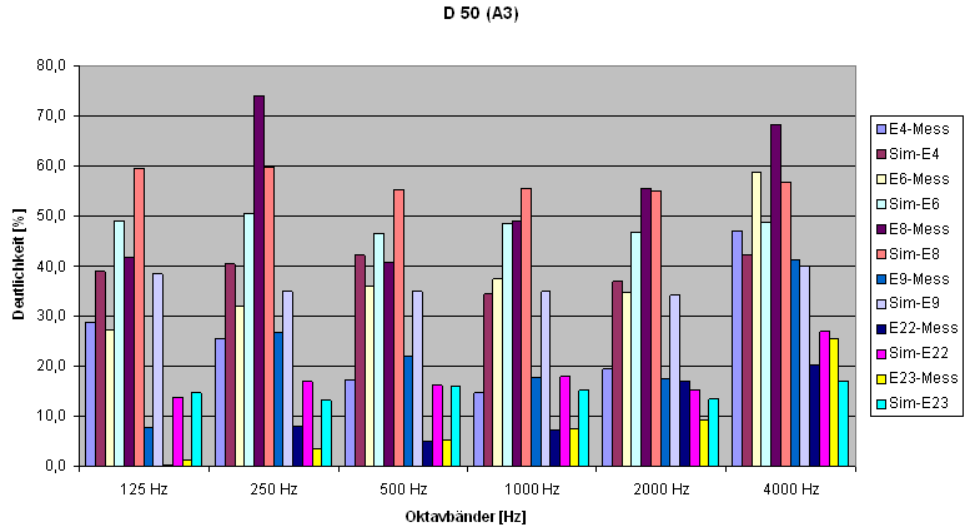


Abb. 73: Mess- und Simulationsergebnis 2009 – Punkt A3, Deutlichkeit (Quelle: eig. Darstellung)

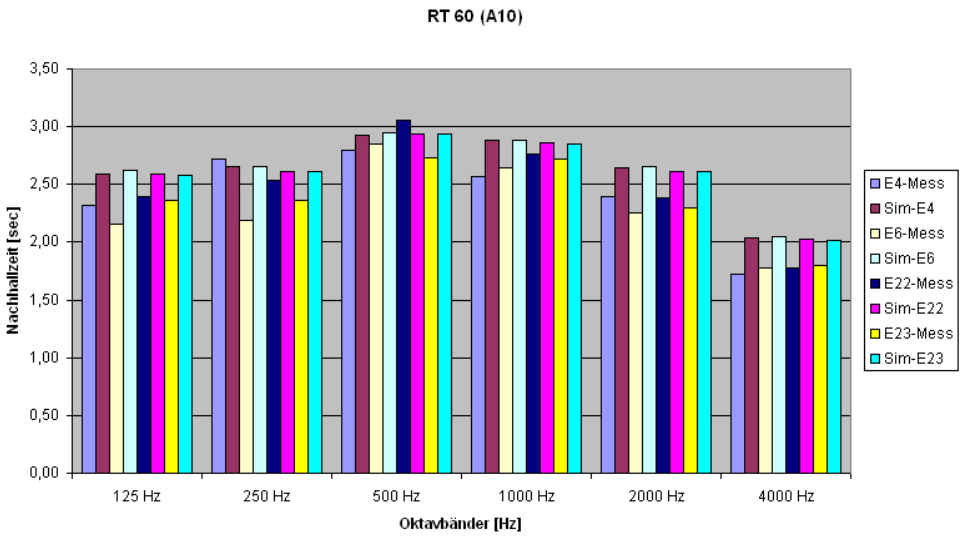


Abb. 74: Mess- und Simulationsergebnis 2009 – Punkt A10, Nachhallzeit (Quelle: eig. Darstellung)

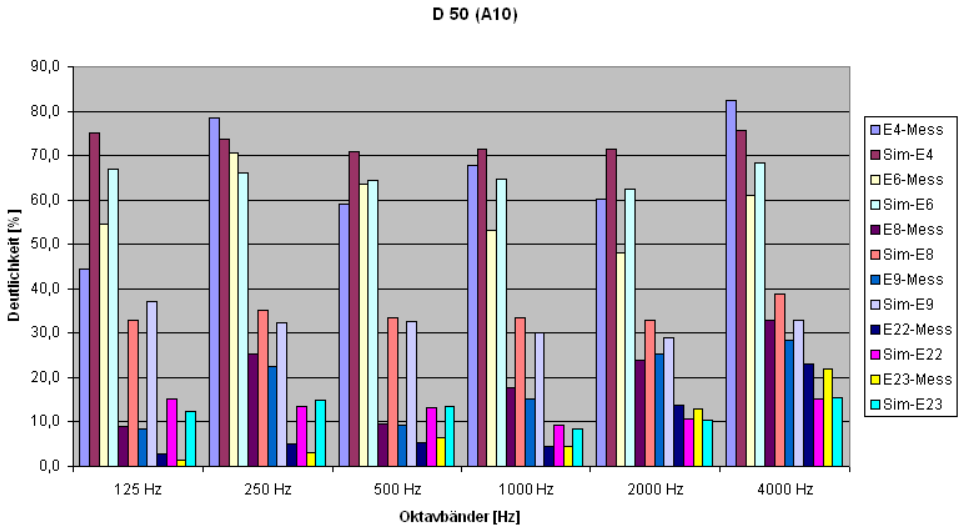


Abb. 75: Mess- und Simulationsergebnis 2009 – Punkt A10, Nachhallzeit (Quelle: eig. Darstellung)

Aus dem Vergleich zwischen Messung und Simulation sind einige Eckpunkte heraus zu lesen.

Die Nachhallzeit verhält sich über alle Empfangsstandorte und Sendepositionen ziemlich gleichmäßig, wobei dieser Effekt stärker sichtbar wird, je weiter der Punkt von der Schallquelle entfernt liegt. Die Abweichung zwischen Messung und Modell ist in den „Rand-Frequenzbändern“ (125, 250, 2000 und 4000 Hz) verhältnismäßig groß. Bei der Anpassung wurde in diesen Frequenzbereichen am meisten verändert. Wie stark sich diese Anpassung ausgewirkt hat, oder ob sichtbar wird, dass die

Werte bei neuerlicher, verfeinerter Anpassung noch weiter an den realen Zustand herankommen oder nicht, kann die Aufgabe weiterführender Untersuchungen werden. Festzuhalten sei aber, dass sich diese Abweichungen im Zehntelsekundenbereich bewegen und daher irrelevant sind.

Fast bemerkenswert ist, wie nahe (abgesehen von geringen Ergebnisstreuungen) simulierte und gemessene Werte beisammen liegen. Dadurch wird sichtbar, dass die Anpassung des Modells an die Sabine´sche Nachhallzeit der richtige Schritt bei der Bearbeitung der Fragestellung war. Aus dem Modell sind wiederum die entsprechenden Absorptionsflächen (siehe Tab. 4) herauszulesen.

Die Deutlichkeit hängt von dem zu betrachtetem Platz ab. Der Streugrad, der bei der Simulation vernachlässigt wurde, hat einen Einfluss auf die Ergebnisse. Es gibt aber einige Bereiche, meist im Nahbereich der Schallquelle, an denen eine gewisse Ähnlichkeit herauszulesen ist. Manchmal ist diese Ähnlichkeit auch nur in einzelnen Frequenzbändern zu sehen, was mit ziemlicher Sicherheit auf einen Zusammenhang mit der Streuung hinweist. In Kapitel 2.3.1.1 – *Reflexion und Streuung* wurde erläutert und durch ein Rechenbeispiel illustriert, dass diffuse Reflexionen an bestimmten Oberflächenbereichen auftreten können, an denen die Strukturen größenordnungsmäßig mit der Wellenlänge übereinstimmen.
Direkt vergleichen lassen sich die Größen nicht, es ist jedoch möglich, gewisse Analogien herauszulesen. Bei all den Überlegungen muss jedoch erwähnt werden, dass die Streuung unberücksichtigt geblieben ist.

4.4 Befragung

4.4.1 Ziele

Ziel der Befragung der Zuhörer war die Abrundung und Ergänzung der messtechnischen Analyse der Raumakustik. Durch die Messungen lassen sich die Nachhallzeit und einige Energiekriterien (Deutlichkeit, Klarheit, Schallpegeldifferenz, usw.) feststellen. Durch den Höreindruck des Publikums können diese Ergebnisse gesichert oder in Frage gestellt werden.

4.4.2 Erste Befragung am 6.6.2009

4.4.2.1 Vorbereitung

Um die Befragung durchführen zu können, wurde ein Plan des Kirchengrundrisses erstellt. Dargestellt wurden die Gebäudeumrisse innen und außen, sowie einen Teil der Inneneinrichtung. Dadurch sollte es auch für die im Umgang mit Plänen weniger geschulten Zuhörer möglich sein, sich im Raum zurecht zu finden. Der Plan selbst wurde auf Grundlage einer alten Bauaufnahme (siehe Kap. 4.1.1) maßstäblich erstellt, wobei das Hauptaugenmerk eher auf der stimmigen Darstellung der Situation gelegt wurde (vgl. Abb. 30).

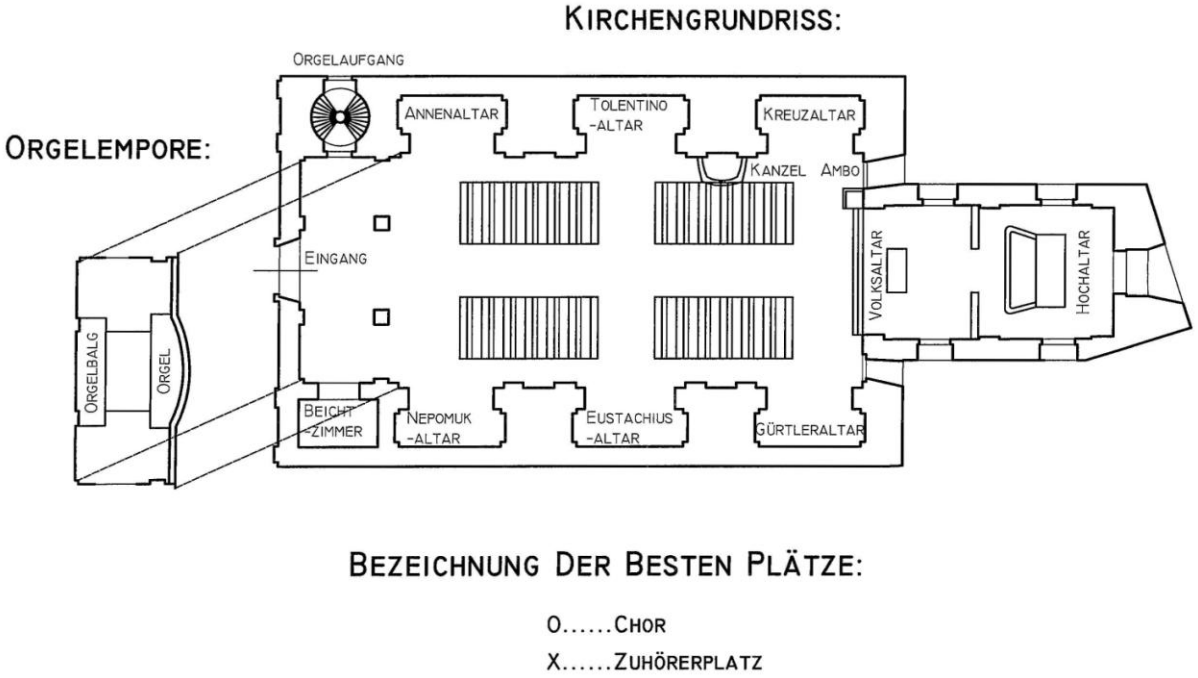


Abb. 76: Fragebogen zur ersten Befragung am 6.6.2009 (Quelle: eig. Darstellung)

Die Fragebögen wurden vervielfältigt und zur Erleichterung der Auswertung nummeriert. Dabei wurden die einzelnen Blätter zufällig auf den Bänken verteilt, um einen Rückschluss auf die Befragten unmöglich zu machen.

Außerdem wurde darauf geachtet, dass die Befragung möglichst einfach und kurz in der Fragestellung gehalten ist, da eine zu umfangreiche Befragung eher widerwillig beantwortet wird.

4.4.2.2 Durchführung

Die erste Befragung fand am 6.6.2009 statt. Dabei wurden die Sänger des Chores „Voices4you“ sowie deren Zuhörer im Rahmen eines Benefizkonzertes befragt.
Bei der Befragung wurde Wert darauf gelegt, dass die Befragten sich nicht untereinander absprechen und keinerlei Informationen zur Befragung im Vorhinein hatten.

Die Befragung der Chorsänger fand vor dem Konzert statt. Abgefragt wurde der „akustisch beste Platz“ für den Chor. Einige der Chormitglieder, die erst seit kurzem in der Kirche gesungen haben, hatten Schwierigkeiten, diese Frage zu beantworten und wandten sich an den Befragungsdurchführenden, der ihnen nahe legte, im Zweifelsfall eher kein Urteil abzugeben.

Die erste Publikumsbefragung fand nach dem Benefizkonzert statt. Die Fragebögen plus Stift wurden vor dem Konzert in den Bänken verdeckt aufgelegt. Es gab keinerlei Erläuterungen vor oder während der Darbietung. Manche Zuhörer erkannten den Grund der verteilten Blätter und wechselten die Plätze während der Darbietungen. Gegen Ende des Konzertes wurde die Befragung erläutert. Dabei wurde gebeten, den „akustisch besten Platz“ sowie den „idealen Zuhörerplatz“ anzugeben. Einige musikalisch besonders interessierte Besucher (teilweise selbst Musiker) fragten nach, ob sie auch mehrere Zustände darstellen dürfen. Andere Besucher wanderten während des Abschlusses (Zugaben) des Konzerts herum und wollten sich ein genaues Bild machen. Ein Teil der Zuhörer, die das erste Mal in dieser Kirche ein Konzert hörten, fühlte sich nicht im Stande, ein Urteil abzugeben.

Abb. 77: Benefizkonzert von „Voices4you“ am 6.6.2009 in Mariabrunn (Quelle: eig. Aufnahme)

4.4.2.3 Ergebnisse

Im Vorfeld der Auswertung wurden die einzelnen Fragebögen nach leeren und ausgefüllten Blättern sortiert. Zusätzlich wurde überprüft, wie viele Bögen tatsächlich ausgegeben wurden, da nicht alle vorbereiteten Fragebögen ausgeteilt worden sind. Es ließ sich ansatzweise erkennen, wie viele Leute keinen Fragebogen ausgefüllt hatten. Bei der Gruppe der Sänger konnte dieser Anteil genauer erfasst werden, als beim Publikum. Letztendlich zählten aber nur die abgegebenen, ausgefüllten Fragebögen für die Erhebung.

Die Ergebnisse wurden nach verschiedenen Gesichtspunkten untersucht und versucht zu quantifizieren. Dabei wurden die Anzahl der Antworten von der Anzahl der Fragebögen unterschieden.
Wenn z.B. ein Fragebogen genau eine Antwort enthielt, dann war die Zuordnung eindeutig. Wurden mehrere Standpunkte angeben, so wurden diese auch entsprechend berücksichtigt, wobei mehrere Bereiche zahlenmäßig aufgeteilt und der beantwortete Fragebogen „geteilt“ wurde, damit die Anzahl der Fragebögen und der Antworten in Summe übereinstimmte.

Zusätzlich erfolgte jeweils für Chor und Zuhörer eine gewichtete Darstellung der Standpunkte im Fragebogen (siehe Abb. 78 und Abb. 79).

Sänger

Ausgangspunkt war die Fragestellung: „Wo ist der (akustisch) beste Standort für den Chor?“

17 Fragebögen sind vorbereitet worden, wovon 15 abgegeben wurden. Bei 3 der 15 Fragebögen wurde auch noch, nach Meinung der Sänger, der beste Zuhörerplatz eingetragen. Die Befragung ergab, dass der „beste“ Platz (33 %) zwischen Volks- und Hochaltar liegt, was den derzeitigen Standplatz für den Chor und bei Bedarf des Orchesters bei „großen“ Messen wiederspiegelt.
Der zweitbeste Platz (27 %) lag vor den Volksaltarstufen. Die restlichen „besten“ Plätze liegen als Einzahlangabe über die Kirche verstreut, vor. Diese Plätze fanden sich eher im hinteren Teil der Kirche (siehe Abb. 78).

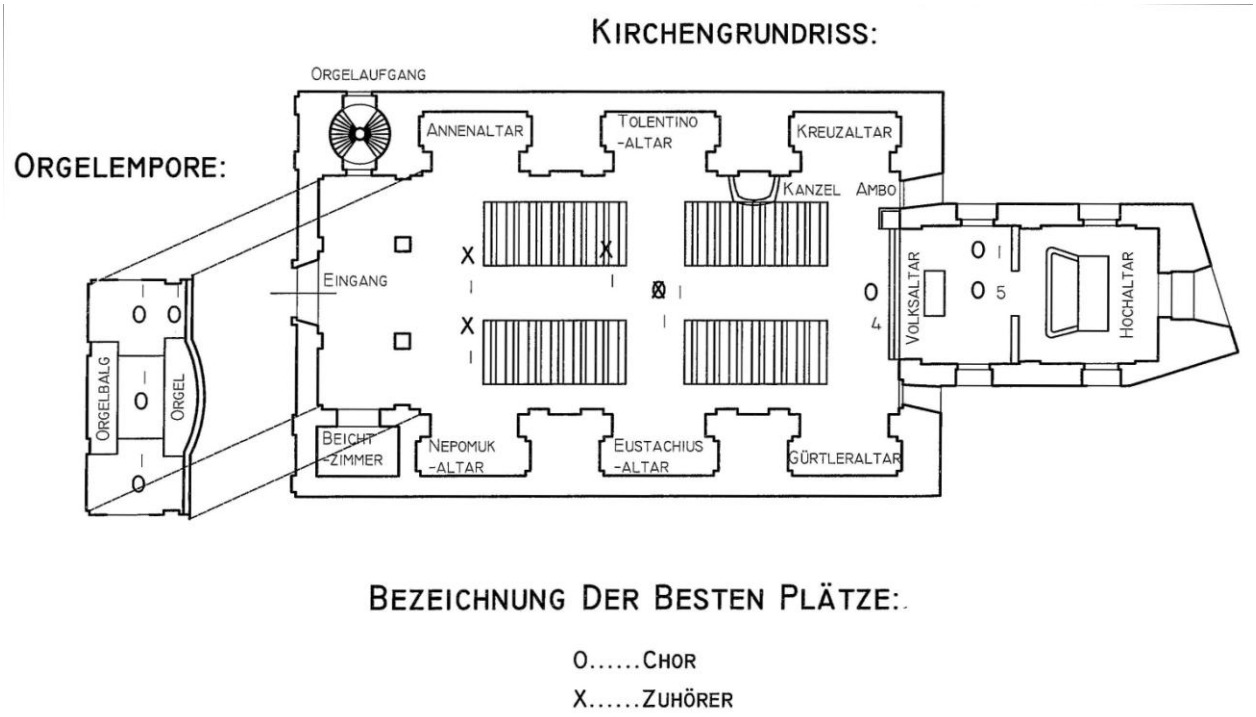


Abb. 78: Ergebnis der ersten Befragung am 6.6.2009 der Sänger (Quelle: eig. Darstellung)

Publikum

Im Gegensatz zur Befragung der Sänger waren die Antworten etwas differenzierter. 110 Fragebögen wurden ausgegeben. 23 kamen ausgefüllt wieder zurück, wobei lt. Schätzungen ca. 50 Leute beim Konzert waren. Von den 23 ausgefüllten Fragebögen wurde bei 2 Bögen kein Chorstandort (als Bezug) eingetragen. Bei einem Fragebogen war nur der Chorstandort, jedoch kein Zuhörerplatz angeführt.

Fragestellung war hier: „Wo ist der beste Zuhörerplatz?“ und für Leute, die die Kirche akustisch etwas besser kannten, wurde noch nachgefragt, wo „ihrer Meinung der Chor am besten stehen solle“. Gleichzeitig wurden alle gebeten, auch den Standort des Chores, als Bezug anzugeben.

Die Ergebnisse zeigten eine größere Streuung als bei den Sängern. Es lassen sich jedoch Tendenzen erkennen. Viele Befragte gaben als Chorstandort die Situation beim Konzert an. Die davon abweichenden Standorte gaben eher die Situation bei Orchestermessen wieder.

Tendenziell kann gesagt werden, dass der Chor, wenn er im Altarraum steht, am besten (29 %) im mittleren Bereich gehört wird. Weiters waren die Plätze im vorderen Bereich (17 %) ganz gut. Im hinteren Bereich gab es ebenfalls eine Häufung von „guten“ Plätzen (17 %).
Interessant ist zu beobachten, dass die Plätze in der Reihe zwischen den beiden Bankblöcken als gut angesehen werden. Es waren aber nur 3 Eindrücke pro Seite (also jeweils 9 %). Es ist also die Vermutung nahe liegend, dass sich der Bereich um den „Mittelpunkt“ der Kirche bis zu den Seitenaltären ausdehnt.

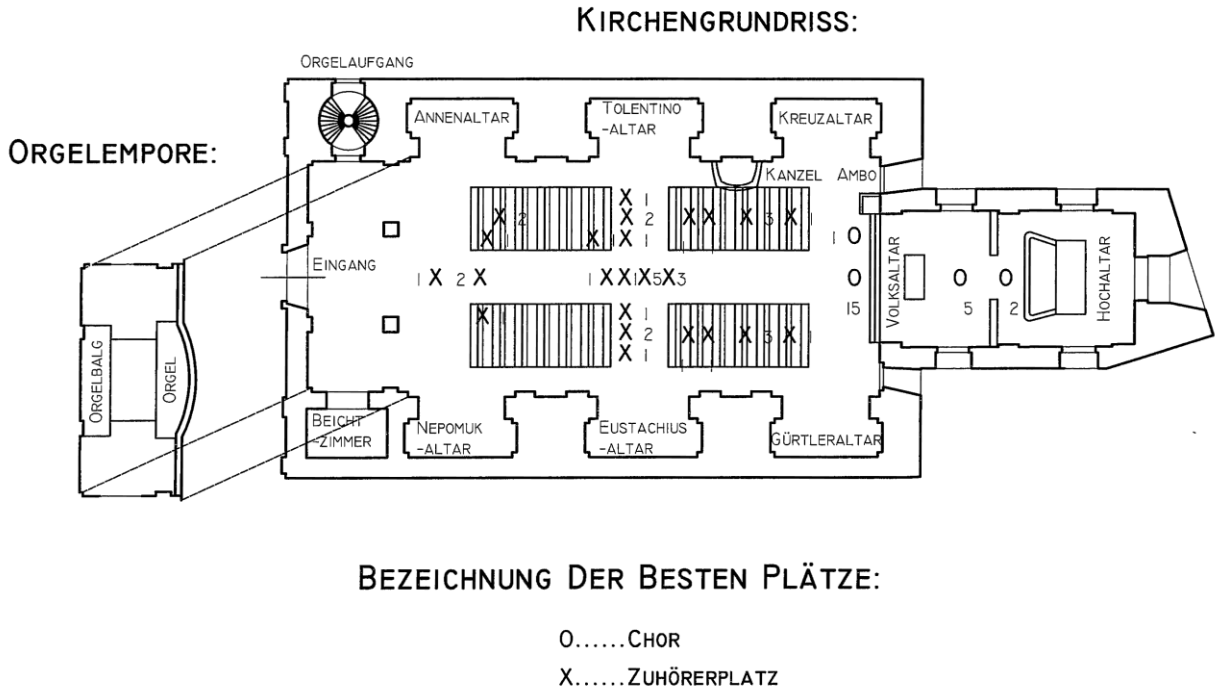


Abb. 79: Ergebnis der ersten Befragung am 6.6.2009 des Publikums (Quelle: eig. Darstellung)

4.4.2.4 Probleme

Bei der Durchführung der Befragung traten einige Probleme auf, die in der nächsten Befragung behoben wurden.

Wie kann vermieden werden, dass sich die Leute untereinander „absprechen“?

Bei der Befragung der Chorsänger war eine überschaubare Gruppe von 20 Leuten in einem Raum und jeder hat versucht, seine Antwort einzutragen. Gelegentlich wurden Fragen zur Bearbeitung an den Umfrageleiter gestellt. Es stellte sich aber kein Gruppenzwang, oder sonst eine Form von Meinungsbildung ein.
Da die Sänger öfters in dieser Kirche singen und dadurch die akustischen Gegebenheiten bekannt sind, konnte im Ergebnis eine eindeutige Richtung festgestellt werden.

Bei der Befragung des Publikums war die Beobachtung der Leute beim Antworten aufgrund der größeren Anzahl der Beteiligten schon etwas schwieriger. Ob der Verweis auf die Sinnhaftigkeit der Ergebnisse hilfreich war, kann nicht gesagt werden.

Wie führt man eine Befragung im Rahmen des Gottesdienstes durch?

Da es während des Gottesdienstes selbst schwer möglich ist, Hinweise zur Befragung zu geben, bzw. zur Befragung hin zu führen, kann nur am Beginn bzw. kurz vor dem Ende der Messe etwas dazu gesagt werden. Diese Idee wurde abgewogen, um noch zusätzliche Befragungen durchführen zu können. Letztendlich wurde von dem Vorhaben Abstand genommen, da der Priester und andere Sprecher den Raumklang beeinflussen und damit den Eindruck der Zuhörer.

Welche Fragen werden gestellt und welche Hinweise bei der Befragung gegeben?

Werden Sänger befragt, ist es nicht sinnvoll nach dem „akustisch besten“ Zuhörerplatz zu fragen. Gefragt sollte eher nach dem „akustisch besten“ Platz für den Chor werden. Haben die Sänger eine gewisse Kenntnis der Örtlichkeit, so ist dies ebenso vermerken zu lassen. Eine Antwort von jemandem, der die Akustik weniger gut kennt kann problematisch werden.

Wird das Publikum nach den „besten Plätzen“ befragt, so ist immer auch die Lage des Chores anzugeben. Falls der Chor für das Publikum nicht sichtbar ist, so ist dem Publikum die ungefähre Lage des Chores eintragen. Selbst wenn durch verschiedene akustische Reflexions- und Beugungseffekte der Sendestandort nicht genau wahrgenommen werden kann, so ist diese Aussage für das Ergebnis der Befragung doch interessant.

Die Frage nach möglichen anderen Standorten für den Chor ist sinnlos.

Erfahrene Zuhörer können die Räumlichkeiten in akustischer Sicht anders einschätzen und sind im Stande, zu den verschiedenen bekannten, möglichen Chorpositionen den „besten“ Zuhörerplatz aufzufinden. Ob diese Ergebnisse brauchbar sind sei dahingestellt. Für ein möglichst „objektives“ Befragungsergebnis ist es sinnvoller, wenn man völlig unvoreingenommen zu einer Befragung geht.

4.4.3 Zweite Befragung am 19.6.2009

4.4.3.1 Verbesserung der ersten Befragung, Vorbereitung

Am 19.6.09 fand eine weitere Befragung statt. Der Chor „Voices4you“ stellte sich mit 3 Stücken aus dem aktuellen Chorprogramm zur Verfügung. Zielsetzung war, dass der Chor von unterschiedlichen Stellen in der Kirche singt und die Zuhörer ihre Eindrücke auf einem Fragebogen festhalten. Bei der Befragung stand die Textdeutlichkeit an den verschiedenen Stellen im Vordergrund.

Die Zuhörer setzten sich aus Musikinteressierten, Musikschaffenden und „gewöhnlichen“ Zuhörern zusammen. Es waren insgesamt 10 Leute anwesend, wovon ein Drittel angab, selbst ein Instrument zu spielen bzw. zu singen.

Die Auswahl der Stücke war willkürlich. Es wurde darauf geachtet, dass sowohl schnelle Lieder mit viel Text als auch getragenere Stücke mit weniger Text aufgeführt wurden. Es wurde alles „a capella“ (ohne Begleitinstrumente) gesungen.

4.4.3.2 Durchführung

Durchführung

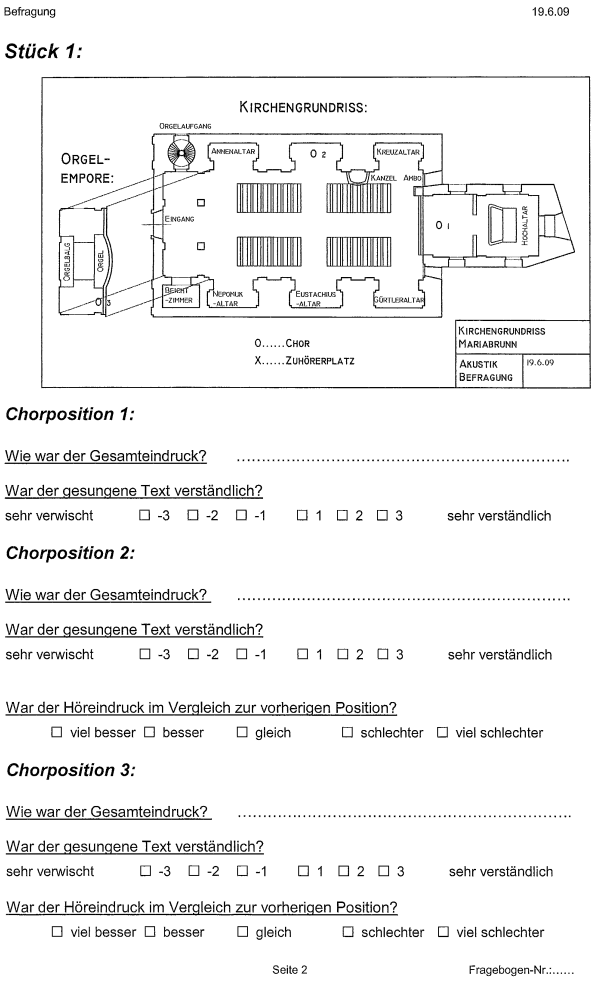
Im Vorfeld wurde ein Fragebogen erstellt, der einerseits eine Skizze der Kirche enthielt, damit die Zuhörer ihre Standorte angeben konnten sowie die Fragen zu: Höreindruck, Textverständlichkeit und dem Vergleich des Höreindrucks zur vorherigen Chorposition.

Die Textdeutlichkeit und der vergleichende Eindruck wurden in einer Skala von 1 – 6 bzw. 1 – 5 ähnlich dem Schulnotensystem abgefragt. Die Frage zum Gesamteindruck konnte individuell beantwortet werden.

Die Zuhörer wählten nach einer kurzen Einführung die Plätze und der Chor sang dasselbe Stück an 3 verschiedenen Orten (Altarraum, Seitenaltar, Orgelempore). Danach wechselten die Zuhörer die Plätze und das nächste Stück wurde gesungen. Zwischendurch wurden die Eindrücke am Fragebogen festgehalten.

Parallel dazu wurde an 2 fixen Empfangsstandorten der Schalldruckpegel und die Nachhallzeit (sofern vom Stück her mögliche) messtechnisch erfasst.

Zum Abschluss wurde „außer Konkurrenz“ noch ein weiters Stück gesungen. Diesmal standen die Sängerinnen und Sänger auf der Kanzel, die in früheren Zeiten für die Predigt des Priesters genutzt wurde und aus akustischer Sicht einen besonderen Platz darstellt.
Ein Teil der Standorte des Chores wurden bei der akustischen Messung am 27.6.2006 betrachtet. Dadurch war es möglich einen gewissen Bezug zwischen Messung, Simulation und Befragung herzustellen.



Befragung 19.6.09

Stück 1:

KIRCHENGRUNDRISS:

ORGEL-EMPORE:

ORGELAUFGANG · ANNENALTAR · O 2 · KREUZALTAR · KANZEL · AMBO · EINGANG · O 1 · HOCHALTAR · ORGELBAU · ORGEL · O 3 · GEBET-ZIMMER · NEPOMUK-ALTAR · EUSTACHIUS-ALTAR · GÖRTLERALTAR

O.....CHOR
X.....ZUHÖRERPLATZ

KIRCHENGRUNDRISS MARIABRUNN
AKUSTIK BEFRAGUNG 19.6.09

Chorposition 1:

Wie war der Gesamteindruck? .....

War der gesungene Text verständlich?
sehr verwischt ☐ -3 ☐ -2 ☐ -1 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 sehr verständlich

Chorposition 2:

Wie war der Gesamteindruck? .....

War der gesungene Text verständlich?
sehr verwischt ☐ -3 ☐ -2 ☐ -1 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 sehr verständlich

War der Höreindruck im Vergleich zur vorherigen Position?
☐ viel besser ☐ besser ☐ gleich ☐ schlechter ☐ viel schlechter

Chorposition 3:

Wie war der Gesamteindruck? .....

War der gesungene Text verständlich?
sehr verwischt ☐ -3 ☐ -2 ☐ -1 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 sehr verständlich

War der Höreindruck im Vergleich zur vorherigen Position?
☐ viel besser ☐ besser ☐ gleich ☐ schlechter ☐ viel schlechter

Seite 2 Fragebogen-Nr.:.....

Abb. 80: Fragebogen für die zweite Befragung am 19.6.2009 – Teilausschnitt (Quelle: eig. Darstellung)

Auswertung

Zuerst wurden die allgemeinen Daten erfasst, um daraus die Altersverteilung und den Anteil der Musikausführenden zu ermitteln. Im nächsten Schritt erfolgte die gesammelte Aufstellung der Antworten. Dabei wurden die Angaben zur Deutlichkeit und zum vorigen Eindruck ausgezählt und in einen Anteil zur Gesamtzuhörerzahl umgerechnet. Der Gesamteindruck war sehr vielfältig und diente dazu, das aus den Antworten vermittelte Bild abzurunden. Gleichzeitig wurden die Hörstandorte in einem Übersichtsplan eingetragen. Zusätzlich wurde versucht, die Antworten in der Skizze sichtbar zu machen.
Die einzelnen Antwortmöglichkeiten wurden in Klassen umgewandelt. Die Deutlichkeit wurde in römische Zahlen (siehe Tab. 6) und der Vergleichseindruck in Buchstaben (siehe Tab. 6) kategorisiert.

4.4.3.3 Ergebnisse

Es zeigten sich kaum Unterschiede zwischen den einzelnen Stücken. Der Charakter des Stückes hatte einen Einfluss auf das Ergebnis und auch wie die Sänger das Stück interpretieren.

Weiters ist zu beobachten gewesen, dass sich die Zuhörer, abwechselnd immer wieder auf die gleichen Plätze gesetzt haben. Gelegentlich wurden, für den Gottesdienstbetrieb eher ungewöhnliche Hörerplätze aufgesucht. Bei gleicher Situation (gleicher Chorplatz, gleicher Zuhörerplatz), aber unterschiedlichen Zuhörer, gab es kaum Abweichungen bei der Antwort.

Trotz der geringen Anzahl an Zuhörern konnten bestimmte Tendenzen in den Antworten erkannt werden. Ob das mit der leeren Kirche zusammenhängt (Abgrenzung Direktschallfeld – diffuses Schallfeld) ist noch weiter zu überlegen.

In der nun folgenden detaillierten Aufstellung werden die Ergebnisse für die einzelnen Chorpositionen angeführt.

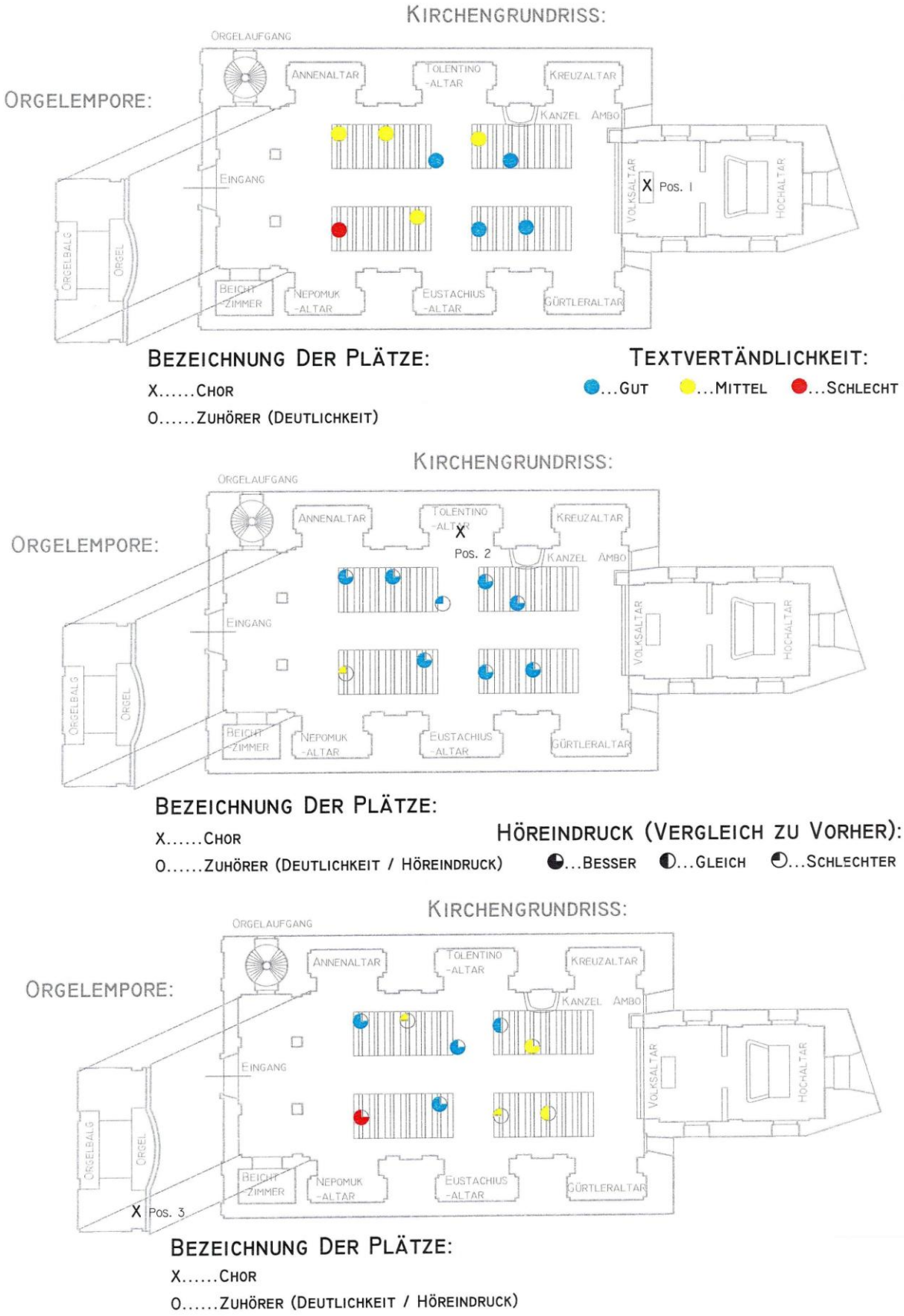


Abb. 81: Ergebnis der Befragung vom 19.6.2009 – Stück 1 (Quelle: eig. Darstellung)

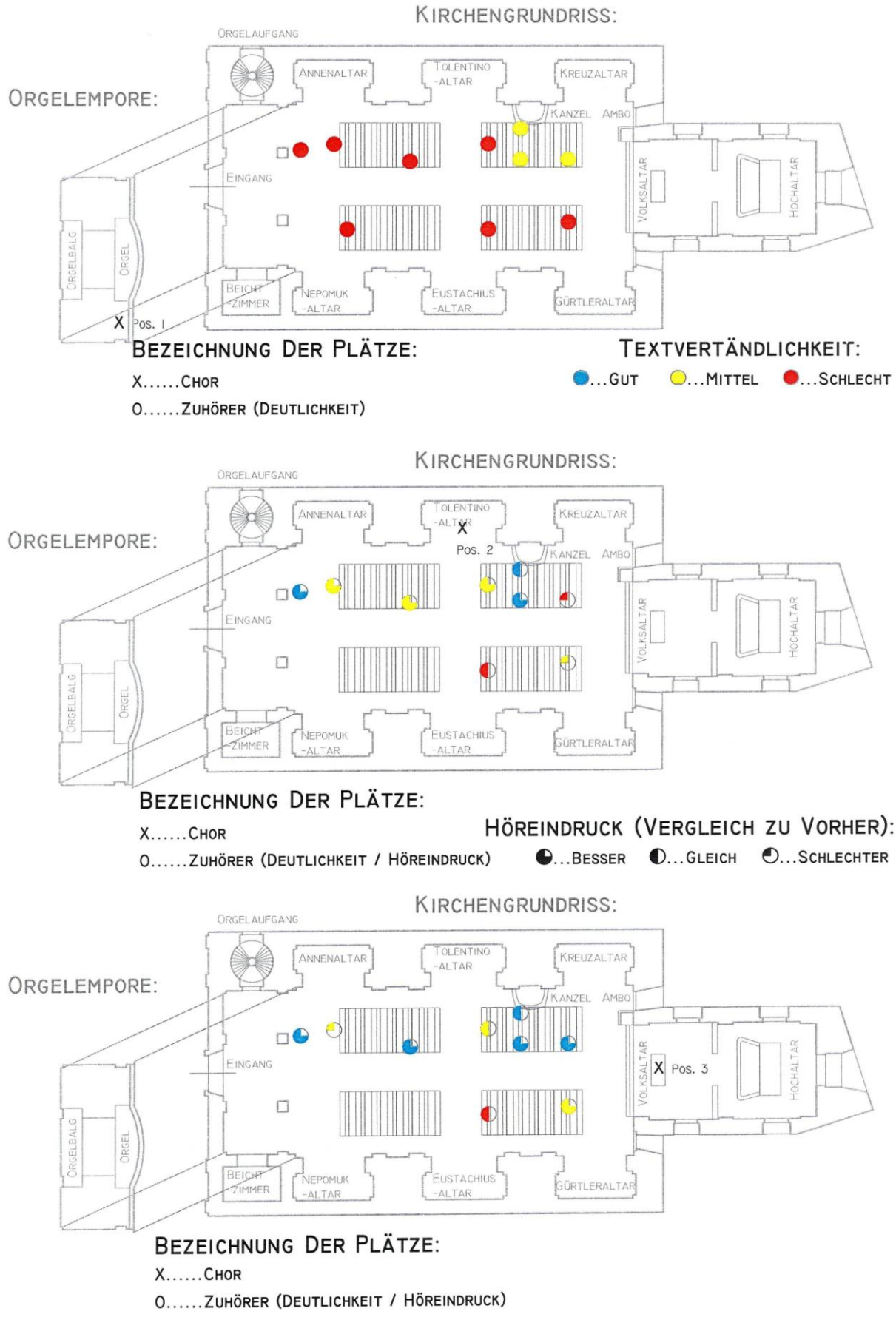


Abb. 82: Ergebnis der Befragung vom 19.6.2009 – Stück 2 (Quelle: eig. Darstellung)

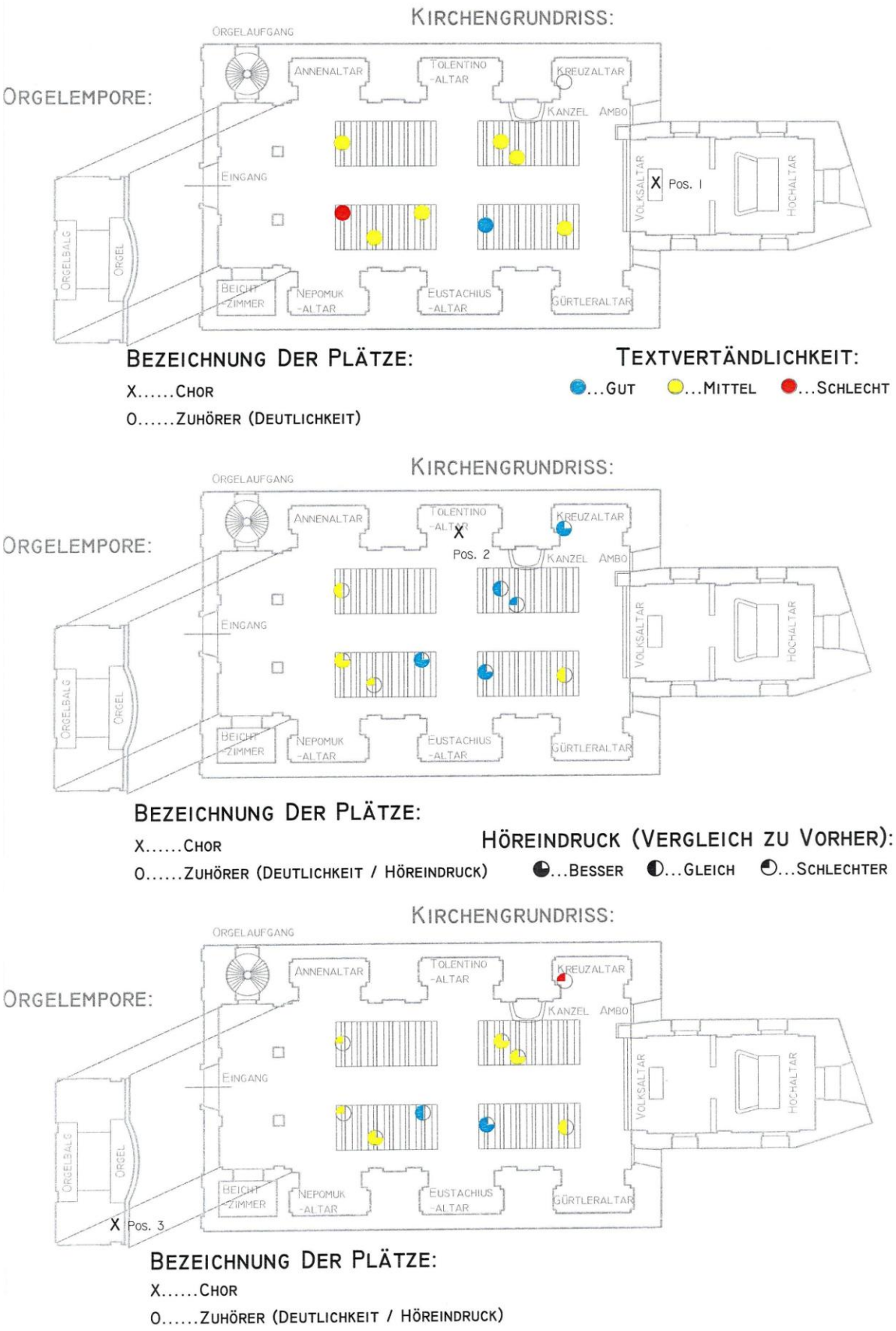


Abb. 83: Ergebnis der Befragung vom 19.6.2009 – Stück 3 (Quelle: eig. Darstellung)

4.4.4 Zusammenfassung

Ergebnis der Befragung zu den einzelnen Plätzen:

Altar

Stück 1: Die Deutlichkeit ist hoch, aber nicht maximal
Stück 2: Die Deutlichkeit ist relativ hoch, aber nicht maximal.
Die Verbesserung des Eindrucks im Vergleich zur Seite ist eher mittel
Stück 3: Die Deutlichkeit ist eher mittel

Seitenaltar

Stück 1: Deutlichkeit ist besser als zuvor (sehr hoch),
Die Verbesserung des Eindrucks im Vergleich zum Altar ist stärker
Stück 2: Deutlichkeit ist im Mittel, die Ergebnisse sind aber sehr breit gestreut.
Die Verbesserung des Eindrucks im Vergleich zur Empore ist stärker
Stück 3: Deutlichkeit ist besser als bei den anderen beiden Punkten.
Die Verbesserung des Eindrucks im Vergleich zum Altar ist mittel (weit gestreut)

Empore

Stück 1: Die Deutlichkeit ist wieder auf dem Level wie am Altar.
Die Verbesserung des Eindrucks ist mittel
Stück 2: Deutlichkeit ist gering.
Stück 3: Deutlichkeit im Mittel.
Die Verbesserung des Eindruckes kann nicht klar zugeordnet werden. Sie reicht von weit gestreut bis mittelmäßig

Die graphische Zusammenstellung wurde auch tabellarisch nachvollzogen. Dazu wurden die Ergebnisse der Befragung in Gruppen, pro Stück und den Chorstandort aufgeschlüsselt. Der Gesamteindruck, den die Zuhörer bei den Darbietungen angegeben haben, wurde zur Deutung bzw. Untermauerung der Angaben zu Textverständlichkeit und den Vergleich des Höreindrucks herangezogen.
Direkt aufgrund der Ordinalskala vergleichbar waren die Textdeutlichkeit und die Veränderung des Höreindruckes (jeweils bei der zweiten und dritten Chorposition).

Die Ergebnisse der Befragung über die Deutlichkeit wurde in 3 Gruppen zusammen gefasst (I – verständlich / II – mittel / III – verwischt). In der Befragung waren die genannten Gruppen nochmals unterteilt. In der Tabelle wurde die Anzahl der jeweiligen Antworten pro Gruppe mit der Wertigkeit der Gruppe (I entspricht dem Gewicht 1 usw.) multipliziert und der Mittelwert gebildet. Die Ergebnisse (pro Stück) und Position wurden aufgetragen (je niedriger der gewichtete Mittelwert, desto deutlicher) (siehe Tab. 10)

Bei der Quantifizierung des Höreindruckes (im Vergleich zur vorherigen Darbietung) wurde die Gewichtung mit den Skalenwerten vorgenommen. Da es bei dem Vergleich auch negative Werte gab (-2 → viel schlechter, -1 → schlechter, usw.) gilt auch hier der kleinere Wert, der den besseren Eindruck widerspiegelt.

Tab. 6: allgemeine Datenauswertung (Quelle: eig. Darstellung)

		Befragung 19.6.09			
Anzahl der Fragebögen:			9		
Allgemeine Daten:			Anzahl:		Prozentsatz:
Geschlecht:					
	männlich		6		66,7%
	weiblich		3		33,3%
Altersgruppe:					
	bis 20		1		11,1%
	20 - 40		3		33,3%
	40 - 60		3		33,3%
	ab 60		2		22,2%
Konzertbesuch:					
	Oft		3		33,3%
	Selten		4		44,4%
	Nie		2		22,2%
Sänger:					
	ja		3		33,3%
	nein		6		66,7%
Musiker:					
	ja		3		33,3%
	nein		6		66,7%
Instrument:			Anzahl der Nennung:		
	Gitarre		1		
	Klavier		2		
	Orgel		1		
	Akkordeon		1		
	Schlagzeug		1		
Bei den folgenden Aussagen muß berücksichtigt werden, daß trotz Zuhörer und Chor die Kirche (relativ) leer war.					
Die Zusammenfassung der Aussagen über die Deutlichkeit erfolgt in Klassen					
Klasse:					
III	III	II	II	I	I
-3	-2	-1	1	2	3
sehr verwischt					sehr verständlich
Die Zusammenfassung der Aussagen über den Höreindruck erfolgt in Klassen					
Klasse:					
A	A	B	C	C	
viel besser	besser	gleich	schlechter	viel schlechter	

Tab. 7: Übersicht Stück 1 (Quelle: eig. Darstellung)

Stück 1:		Pos. 1	Anzahl	Prozent	Pos. 2	Anzahl	Prozent	Pos. 3	Anzahl	Prozent
(The Lion sleeps tonight)		Altar			Seitenaltar			Empore		
Gesamteindruck:										
Unterschiede gut hörbar			1							
deutlicher						1				
nicht so gut hörbar									1	
Gut und Klar			1							
einzelne Textteile verständl			1							
Textdeutlichkeit gut						1				
Klar verständlich									1	
relativ deutlich									1	
Textverständlichkeit:										
sehr	-3		0			0				
verwischt	-2		1	11%		0			1	11%
	-1		1	11%		1	11%			
	1		3	33%		0			3	33%
sehr	2		4	44%		1	11%		3	33%
verständlich	3		0			7	78%		2	22%
Vergleich des Hör-eindrucks										
2	viel besser					2	22%		1	11%
1	besser					5	56%		4	44%
0	gleich								2	22%
-1	schlechter					2	22%		2	22%
-2	iel schlechter									
	gew. Mittel		0			0,77777778			0,44444444	
	Summe								1,22222222	

Tab. 8: Übersicht Stück 2 (Quelle: eig. Darstellung)

Stück 2:		Pos. 3	Anzahl	Prozent	Pos. 2	Anzahl	Prozent	Pos. 1	Anzahl	Prozent
(The Rose)		Empore			Seitenaltar			Altar		
Gesamteindruck:										
Schattierungen hörbar			1							
Text eher unverständlich			1							
guter Gesang										
Töne etwas vermischt										
Text unverständlich										
zu sehr im Hintergrund						1				
am besten									1	
nicht zu laut									1	
Textverständlichkeit:										
sehr	-3		1	11%						
verwischt	-2		5	56%		2	22%		1	11%
	-1		2	22%					1	11%
	1					5	56%		2	22%
sehr	2		1	11%		1	11%		4	44%
verständlich	3					1	11%		1	11%
Vergleich des Hör-eindrucks										
2	viel besser								3	33%
1	besser					5	56%		2	22%
0	gleich					2	22%		3	33%
-1	schlechter					2	22%		1	11%
-2	iel schlechter									
	gew. Mittel		0			0,33333333			0,77777778	
	Summe								1,11111111	

Tab. 9: Übersicht Stück 3 (Quelle: eig. Darstellung)

Stück 3:		Pos. 1	Anzahl	Prozent	Pos. 2	Anzahl	Prozent	Pos. 3	Anzahl	Prozent
(KOM, aus dem Film:		Altar			Seitenaltar			Empore		
"Wie im Himmel")										
Gesamteindruck:										
wenig Text, nur Melodie			1							
deutlicher						1				
genauso wie vorher									1	
etwas ferne			1							
besser						1				
etwas dumpf									1	
von oben									1	
Textverständlichkeit:										
sehr	-3									
verwischt	-2		1	11%					1	11%
	-1		2	22%					3	33%
	1		5	56%		4	44%		3	33%
sehr	2		1	11%		3	33%		1	11%
verständlich	3					2	22%		1	11%
Vergleich des Hör-eindrucks										
2	viel besser					2	22%		1	11%
1	besser					2	22%		3	33%
0	gleich					3	33%		2	22%
-1	schlechter					2	22%		3	33%
-2	iel schlechter									
	gew. Mittel		0			0,44444444			0,22222222	
	Summe								0,66666667	

Tab. 10: Zusammenfassung der Tabellen (Quelle: eig. Darstellung)

	Tabellarische Auswertung der Befragung			
	stück1			
	altar	seitenaltar	empore	
III	7	1	6	
II	0	7	2	
I	0	0	0	
gew. Mittel	2,333	1,889	2,444	2,222
gew. Mittel	0	0,778	0,444	
	stück2			
	altar	seitenaltar	empore	
III	1	2	6	
II	3	5	2	
I	5	2	1	
gew. Mittel	1,556	2	2,556	2,037
gew. Mittel	0,778	0,333	0	
	stück3			
	altar	seitenaltar	empore	
III	1	0	1	
II	7	4	6	
I	1	5	2	
gew. Mittel	2	1,444	1,889	1,778
gew. Mittel	0	0,444	0,222	
	1,963	1,778	2,296	

In der zusammenfassenden Tabelle (siehe Tab. 10) wurden die einzelnen Angaben für die Textdeutlichkeit in Bereiche gegliedert. Aus den ursprünglich 6 Antwortmöglichkeiten sind 3 Bereiche (I, II, III) geworden. Es wurden gewichtete Mittelwerte, für jeden einzelnen Chorstandort bestimmt, die dann ihrerseits wieder gemittelt wurden.

Der Einfluss des Höreindruckes wurde ebenfalls quantifiziert (siehe Tab. 7 bis Tab. 9) und ergänzend zur Textverständlichkeit, bewertet. Dabei wurden die einzelnen Angaben mit der Abfrageskala multipliziert (von -2 bis +2). Da es sich um Vergleichswerte handelt, fällt immer ein Punkt aus, der in der Mittelung mit 0 aufscheint. Je niedriger der Wert, umso schlechter der Höreindruck. Der Übersichtlichkeit halber wurde diese rechnerische Zusammenfassung in den nach Stücken zusammengestellten Auswerteblättern durchgeführt und in der zusammenfassenden Tabelle unterhalb der gewichteten Mittelwerte für die Textverständlichkeit positioniert..

Die gelb hinterlegten Zahlen (in Tab. 10) zeigen die beste Textdeutlichkeit. Die gemittelten Mittelwerte rechts neben der Tabelle geben einen generellen Aufschluss über die Textverständlichkeit der Stücke. Die gemittelten Mittelwerte unterhalb der Tabelle weisen auf den Standort mit dem besten Höreindruck hin.
Die rot und grün hinterlegten Zahlen weisen auf den Höreindruck hin.
Warum, trotz des niedrigen Wertes des Höreindrucks von Stück 1 und 3, nicht der Sendepunkt „Seitenaltar“ als bester Sendestandort bewertet wurde liegt daran, dass dieser Standort für die meisten Zuhörer im Direktschallfeld lag und daher nicht aussagekräftig (im Gesamteindruck) war. Der qualitativ nächst bessere Punkt war dann jeweils der Punkt „Empore“.

Befragungsergebnis:

Der Platz im Altarraum wird für Musikaufführungen als bestens geeignet angesehen. Im Vergleich zur Orgelempore ist er aber nicht schlechter, oder besser. Bei manchen Stücken kann die Textdeutlichkeit generell schlechter werden (und dieser Eindruck verstärkt sich auch bei den verschiedenen Standorten). Für die Sänger und einen

Großteil der Kirchenbesucher und Kirchenbesucherinnen ist der Chorstandort „Altarraum“ besser als der Standort „Orgelempore“.

Der Platz im Seitenaltar liegt für einen Großteil der Zuhörer im direkten Schallfeld der Sänger (sprich sie befinden sich im Hallradius). Dadurch ist die Textverständlichkeit relativ gut, aber der Eindruck ist es nicht. Da der Hallradius bei voller Kirche höchstwahrscheinlich geringer ist, kann es auch zur Deutlichkeitsabnahme kommen.

In Anlehnung an das einleitende Kapitel über die historische Nutzung der Kirche (siehe Kap. 2.2.2.1), sei noch einmal in Erinnerung gerufen, dass diese Kirche eine Kloster- und Wallfahrtskirche war. Wenn nun in der vollen Kirche an jedem Altar ein Priester Messe liest, so ist es für alle Beteiligten nicht nur nachteilig, wenn bloß ein kleiner Kreis um den Altar etwas hört. Für heutige Nutzungen kann das eher problematisch sein.

5 Ergebnisse, Ausblick

Die Zusammenschau der Ergebnisse und der Verweis auf weiterführende Untersuchungen können in mehrere Bereiche aufgegliedert werden.

Analyse aus der Arbeit selbst

Die Modellerstellung aus dem historischen, durch Nachmessung überprüften, Planmaterial und den Literaturwerten brachte ein recht brauchbares Modell hervor. Ein vereinfachtes Modell, welches parallel zu den Messungen vom Juni 2006 erstellt wurde, wies auf noch zu bearbeitenden Modellbereiche hin. Bereits im nicht kalibrierten Modell konnten bestimmte raumakustische Zusammenhänge erkannt werden.

Die Anpassung des Modells erfolgte über die Sabine´sche Nachhallzeit, die im Juni 2006 in der Kirche gemessen wurde.
Angepasst wurden die Absorptionsgrade der Flächen, wobei vorrangig die Oberflächen der Einrichtung bearbeitet wurden.

Bei der Überprüfung des Modells durch Messungen im Dezember 2009 zeigte sich, dass die Anpassung in gewissen Bereichen gelungen war.
Die Nachhallzeit, die als Stellgröße für die Kalibrierung des Modells diente, wich beim Vergleich zwischen dem angepassten Modell und der Messung über weite Teile des Raumes nur gering ab. Es zeigte sich, dass die Nachhallzeit als Stellgröße für die Anpassung der Schallabsorptionsgrade gut geeignet war. Nicht unerwähnt bleiben darf, dass die Abweichung in Bereichen nahe der Schallquelle höher war.

Als zweiter Parameter für den Vergleich der Simulation mit den Messungen wurde die Deutlichkeit herangezogen. Da sich die anderen Energiekriterien ähnlich wie die Deutlichkeit verhalten, wurde nur dieses Kriterium verglichen. Wie schon bei der Betrachtung der Nachhallzeit wurden aufgrund der besseren Übersicht nur bestimmte Platzbereiche studiert.

Ähnlichkeiten bei der Deutlichkeit zwischen Messung und Simulation sind eher schwer zu erkennen, was daraufhin weist, dass dieser Parameter stark platzabhängig ist. Aus dem Vergleich Modell – Messung kann man erkennen, dass die Deutlichkeit (bzw. auch andere Energiekriterien) von der Streuung beeinflusst wird. Dazu sei auf eine Diplomarbeit [Hwa06] von DI. Hwang verwiesen, in der die Streugrade von einem Teilbereich des Wiener Musikvereinssaales gemessen und die Ergebnisse in einem Simulationsmodell überprüft wurden.

Ergebnisse aus der raumakustischen Untersuchung mittels Modell

Zusammenfassend aus den Ergebnissen der flächenhaften Darstellung der Simulationsergebnisse sowie aus den Werten für einzelne Empfangsstandorte lassen sich folgende Aussagen treffen.
Die Nachhallzeit liegt in einem für Räume dieser Größenordnung eher niedrigen bis normalen Bereich. Von Kirchen erwartet man normalerweise einen gewissen Nachhall, der auch hier in einem passenden Maß vorhanden ist und nicht unangenehm werden kann. Auf den ersten Blick ideale Voraussetzungen, denkt man sich.

Allerdings „trägt“ die Kirche nicht, sprich der Schall nimmt mit zunehmendem Abstand von der Quelle stark ab. Sichtbar wird das im Parameter Schalldruckpegelabnahme, der relativ hoch ist. Damit gekoppelt ist auch die Deutlichkeit, die nur im direkten Schallfeld gut ist, während sie im diffusen Schallfeld sehr gering werden kann.

Somit gibt es fast keinen Sendepunkt in der Kirche, der eine herausragende Akustik besitzt.
Diese Beobachtungen und Berechnungen wurden in der leeren Kirche gemacht. Bei Vollbesetzung ist dann die Absorption der Leute verhältnismäßig hoch, so dass die Pegelminderung noch größer wird.
Einen Punkt in der Kirche gibt es, an dem die Deutlichkeit etwas höher und die Schalldruckpegelabnahme in bestimmten Bereichen geringer ist, die Kanzel. Konzipiert als barockes Hilfsmittel zur Sprachverständlichkeit ist sie heute nur mehr ein schön gestaltetes Zeitdokument. In der akustischen Betrachtung hat auch dieser Sendepunkt einen endlichen „guten“ Empfangsbereich, der aber bedeutend größer ist als alle anderen Bereiche im Kirchenraum.

In der Einleitung gibt es einen Abschnitt über die Nutzung der Kirche einst und jetzt. Durch die akustischen Untersuchungen wird sichtbar, dass die Erbauer vermutlich ein für die damalige Zwecke sehr brauchbares Objekt geschaffen haben.
Mittlerweile wird die Kirche nicht mehr als Kloster- und Wallfahrtskirche, mit einer anderen Art der Gottesdienstfeier genutzt.
Der prächtige Innenraum dient im Sommer als Rahmen für schöne Hochzeiten. Ein Teil der akustischen Schwierigkeiten, die Verständlichkeit der Sprache, wird durch elektroakustische Maßnahmen ausgeglichen. Für die Aufführung von Musik werden manchmal ebenfalls Verstärkungsmöglichkeiten eingesetzt bzw. in Kauf genommen, dass ein Teil der Zuhörer weniger hört.

Abrundung des Bildes durch die Befragung

Die Befragung(en) haben das Ergebnis der Simulation bestätigt. Im direkten Schallfeld hört man den Chor ganz gut, der Eindruck der Musik ist weniger gut. Auf

die Frage wo man einen Chor am besten hinstellt, damit er von möglichst vielen Leuten gehört wird kann man aufgrund der Befragung sagen: Auf der Orgelempore oder im Altarraum. Beide Standorte sind gleich gut.
Jene Zuhörer, die mit größerem Abstand zum Chor sitzen, hören schlechter, da sich hier die Schalldruckpegelabnahme sehr stark auswirkt.

Nicht mit dem Modell untersucht wurde die Chorposition auf einer Empore über der bestehenden Orgelempore, kurz zweite Empore genannt. Diese zweite Empore ist im Zuge von Umbaumaßnahmen an der Orgel bzw. der Kirchenrückwand abgetragen worden.
Welchen akustischen Einfluss eine solche Sängerempore hat, wäre abzuklären bzw. zu untersuchen.

Bei der Befragung war noch ein interessantes Phänomen zu beobachten. Jene Zuhörer, die gelegentlich in der Kirche Musikdarbietungen hören, empfanden die Chorposition im Altarraum als besseren Standort. Die Leute, die zum ersten Mal in der Kirche ein Konzert hörten, entschieden sich je nach Sitzposition zumeist analog zu den Messergebnissen.
Generell wird unter den Kirchenbesuchern und Kirchenbesucherinnen aber der Platz im Altarraum als „die beste“ Sängerposition gesehen, da die Sänger von hieraus sichtbarer mit dem Publikum in Kontakt treten (können).

Ausblick auf weiterführende Untersuchungen

Der Vergleich zwischen Modell und Simulation, auf der Basis von angepassten Absorptionsgraden aus der Literatur und einem relativ hohen konstant über alle Oberflächen und Frequenzbändern wirkenden Streugrad, war schon recht brauchbar. In erster Linie wurden jedoch die Absorptionsgrade betrachtet, während die Streuung nicht so detailliert untersucht wurde. Eine weitere Verfeinerung der Absorptionsgrade würde wenig zur Verbesserung des Modells beitragen, da die Deutlichkeit (und andere platzabhängige Parameter) von den Streugraden abhängig sind (siehe [Hwa06]).

Abb. 84: Beispiele für die strukturierten Oberflächen der Pfarrkirche (Quelle: eig. Aufnahme)

Das macht ein Verfahren notwendig, mit dem vor-Ort Streugrade und wahrscheinlich auch noch die Absorptionsgrade der stark strukturierten Oberflächen (siehe Abb. 84) in einer höheren Genauigkeit gemessen werden können.

Wie bereits in der Arbeit sichtbar, kann das nicht ohne die genaue, flächenhafte Aufnahme der Oberflächenstruktur (siehe Abb. 84) gelingen.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS:

Abb. 1: Außenansicht der Pfarr- und Wallfahrtskirche Mariabrunn, Wien 14 (Quelle: [Kir07]) 6
Abb. 2: Ursprungsbilder in der Pfarrkirche Mariabrunn – aus der Legende (Quelle: eig. Aufnahme) 7
Abb. 3: Kirchenstandorte im 16. Jahrhundert in der aktuellen Stadtkarte (Quelle: http://www.wien.gv.at/stadtplan/spread.asp?lang=de; 30.12.09) 8
Abb. 4: Situation in der Kirche vor der Liturgiereform (Quelle: Wallfahrtsmuseum Mariabrunn) 10
Abb. 5: Situation in der Kirche nach der Liturgiereform (Quelle: eig. Aufnahme)..... 11
Abb. 6: Zusammenhang zwischen Raumvolumen Und Nachhallzeit (Quelle: [Fas03]) 13
Abb. 7: Definition der Nachhallzeit als Pegelabfall (Quelle: [Fas03]) 14
Abb. 8: Wichtige Frequenzbereiche der Akustik (Quelle: [Fas03]) 15
Abb. 9: Periodendauer und Wellenlänge einer Schwingung (Quelle: eig. Darstellung) 17
Abb. 10: Kurven gleicher Lautstärkepegel L_N für Sinustöne im freien Schallfeld (Quelle: [Fas03]) 19
Abb. 11: Frequenzbewertungskurven A, B und C (Quelle: [Fas03]) 20
Abb. 12: Laufzeit- und Laufwegdifferenz (Quelle: [Fas03]) 22
Abb. 13: Schallleistungs- und Schallleistungspegelbereiche von Sprache, Gesang und Musik (Quelle: [Fas03]) 23
Abb. 14: Prinzipdarstellung zu Absorption, Reflexion und Transmission bei Schalleinfall auf eine Wand (Quelle: [Fas03]) 24
Abb. 15: Zur Definition der äquivalenten Schallabsorptionsfläche A eines Raumes (Quelle: [Fas03]) 26
Abb. 16: Reflexionswirkungen einer Fläche mit Strukturen der Breite b in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ (Quelle: [Fas03]) 28
Abb. 17: geometrisch gerichtete Reflexionen an einer Fläche (Quelle: [Fas03]) 30
Abb. 18: geometrisch gerichtete Reflexionen an einer Ecke (Quelle: [Fas03]) 30
Abb. 19: Prinzipbild mit Schall- und Spiegelquellen (Quelle: [Fas03]) 30

Abb. 20: Reflexionen an konvex und an konkav gekrümmten Flächen (Quelle: [Fas03]) 31
Abb. 20: Beispiele für geometrische Strukturen für diffuse Reflexionen (Quelle: [Fas03]) 32
Abb. 21: Definition der verschiedenen Formen der Nachhallzeit (Quelle: [Fas03]) .. 34
Abb. 22: Raumimpulsantwort dargestellt in Form eines Echogramms (Quelle: [Fas03]) 35
Abb. 23: Schematisierte Raumimpulsantwort (Quelle: [Fas03]) 36
Abb. 24: Raumakustische Kriterien und ihre Optimalwerte (Quelle: [Fas03]) 39
Abb. 25: Vorbereitung zur Nachhallzeitmessung im Juni 2006 (Quelle: eig. Aufnahme) 40
Abb. 26: Messpunkte – Messung vom 27. 06 .2006 (Quelle: eigene Darstellung) ... 41
Abb. 27: Erstellen des vereinfachten Simulationsmodells im Juni 2006 (Quelle: eig. Aufnahme) 41
Abb. 28: Orginalplan von A. Klaar – mit elektrotechnischen Ergänzungen (Quelle: Pfarre Mariabrunn) 43
Abb. 29: Digitalisierter und Bearbeiteter Grundriss der Pfarrkirche Mariabrunn (Quelle: eig. Darstellung) 44
Abb. 31: Kirchenraum – Blick zur Orgelempore mit Modellvergleich (Quelle: eigene Aufnahme) 48
Abb. 34: Grundriss der Kirche – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung) 49
Abb. 35: Grundriss der Orgelempore – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung) 50
Abb. 36: Teilgrundriss Kanzel – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung) 50
Abb. 37: Ansicht Orgelempore – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung) 51
Abb. 38: Ansicht Altarraum – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung) 51
Abb. 39: Schnitt A und B im Kirchenraum – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung) 52

Abb. 40: Schnitt C im Kirchenraum (mit Orgel) – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung) 52
Abb. 41: Schnitt C im Kirchenraum (ohne Orgel) – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung) 53
Abb. 42: Schnitt D im Kirchenraum – inkl. Eingabepunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung) 53
Abb. 43: falsche Zuordnung der Flächen (Quelle: CATT-Manual) 55
Abb. 44: richtige Zuordnung der Flächen (Quelle: CATT-Manual) 55
Abb. 45: Leak-Verteilung am Beispiel Simulations-durchgang mit dem Sender A0 (Quelle: CATT-Simulation) 56
Abb. 46: Leak-Verteilung an der variierten Simulation mit ebenem Hochaltar (Quelle: CATT-Simulation) 57
Abb. 47: Reflexionen an konvex und konkav gekrümmten Flächen (Quelle: [Fas03]) 58
Abb. 48: Simulationsmodell aus 2006 - vereinfachte Modellierung (Quelle: CATT-Simulation) 58
Abb. 49: aktuelles Simulationsmodell - umfangreichere Modellierung (Quelle: CATT-Simulation) 59
Abb. 50: Blick zum Hochaltar – Vergleich Realität u. Modell (Quelle: eigene Darstellung/Modell) 61
Abb. 51: Anpassung des Modells – graphisch (Quelle: eig. Darstellung) 63
Abb. 52: Für die Berechnung verwendete Messstandorte (Quelle: eig. Darstellung) 66
Abb. 53: Sender A0 – Übersicht der Nachhallzeiten (Quelle: eig. Darstellung) 67
Abb. 54: Sender A0 – Darstellung der Audience Area Map, Teil 1 (Quelle: eig. Darstellung) 69
Abb. 55: Sender A0 – Darstellung der Audience Area Map, Teil 2 (Quelle: eig. Darstellung) 69
Abb. 56: Sender A0 – Auswahl der Messpunkte für die Simulation (Quelle: eig. Darstellung) 70
Abb. 57: Erstellen des Messprogramms – Punkt A1 (Quelle: eig. Darstellung) 71
Abb. 58: Erstellen des Messprogramms – Punkt A3 (Quelle: eig. Darstellung) 72
Abb. 59: Erstellen des Messprogramms – Punkt A6 (Quelle: eig. Darstellung) 73
Abb. 60: Erstellen des Messprogramms – Punkt A7 (Quelle: eig. Darstellung) 74

Abb. 61: Erstellen des Messprogramms – Punkt A8 (Quelle: eig. Darstellung) 75
Abb. 62: Erstellen des Messprogramms – Punkt A9 (Quelle: eig. Darstellung) 76
Abb. 63: Erstellen des Messprogramms – Punkt A10 (Quelle: eig. Darstellung) 77
Abb. 64: Messung 29.12.09 – Messanlage (Norsonic RTA 840), inkl. Mikrofonen (Quelle: eig. Aufnahme) 78
Abb. 65: Messung 29.12.09 – Mikrofon inkl. Vorverstärker und Kabel am Stativ (Quelle: eig. Aufnahme) 80
Abb. 66: Messung 29.12.09 – Kalibrieren der Mikrofone (Quelle: eig. Aufnahme) ... 81
Abb. 67: Punktschallquelle des Forschungsbereichs Bauphysik und Schallschutz (Quelle: eig. Aufnahme) 82
Abb. 68: Beispieldiagramm für eine gemessene Impulsantwort (Quelle: eig. Darstellung) 83
Abb. 69: Messung 29.12.09 – alle Messpunkte (Quelle: eig. Darstellung) 84
Abb. 70: Messung 29.12.09 – Messprotokoll (Quelle: eig. Darstellung) 84
Abb. 71: Messung 29.12.09 – Aufbau der Geräte (Quelle: eig. Aufnahme) 85
Abb. 72: Mess- und Simulationsergebnis 2009 – Punkt A1, Nachhallzeit (Quelle: eig. Darstellung) 87
Abb. 73: Mess- und Simulationsergebnis 2009 – Punkt A1, Deutlichkeit (Quelle: eig. Darstellung) 87
Abb. 74: Mess- und Simulationsergebnis 2009 – Punkt A3, Nachhallzeit (Quelle: eig. Darstellung) 88
Abb. 75: Mess- und Simulationsergebnis 2009 – Punkt A3, Deutlichkeit (Quelle: eig. Darstellung) 88
Abb. 76: Mess- und Simulationsergebnis 2009 – Punkt A10, Nachhallzeit (Quelle: eig. Darstellung) 89
Abb. 77: Mess- und Simulationsergebnis 2009 – Punkt A10, Nachhallzeit (Quelle: eig. Darstellung) 89
Abb. 78: Fragebogen zur ersten Befragung am 6.6.2009 (Quelle: eig. Darstellung) 91
Abb. 79: Benefizkonzert von „Voices4you“ am 6.6.2009 in Mariabrunn (Quelle: eig. Aufnahme) 93
Abb. 80: Ergebnis der ersten Befragung am 6.6.2009 der Sänger (Quelle: eig. Darstellung) 94

Abb. 81: Ergebnis der ersten Befragung am 6.6.2009 des Publikums (Quelle: eig. Darstellung) 96
Abb. 82: Fragebogen für die zweite Befragung am 19.6.2009 – Teilausschnitt (Quelle: eig. Darstellung) 99
Abb. 83: Ergebnis der Befragung vom 19.6.2009 – Stück 1 (Quelle: eig. Darstellung) 101
Abb. 84: Ergebnis der Befragung vom 19.6.2009 – Stück 2 (Quelle: eig. Darstellung) 102
Abb. 85: Ergebnis der Befragung vom 19.6.2009 – Stück 3 (Quelle: eig. Darstellung) 103
Abb. 86: Beispiele für die strukturierten Oberflächen der Pfarrkirche (Quelle: eig. Aufnahme) 114

TABELLENVERZEICHNIS:

Tab. 1: Normierte Band-Mittenfrequenz f_m - auszugsweise (Quelle: [Fas03]) 16
Tab. 2: Anpassung des Modells – tabellarisch (Quelle: eig. Darstellung) 63
Tab. 3: Absorptionseigenschaften am Beginn der Anpassung (Quelle: eig. Darstellung) 64
Tab. 4: Absorptionseigenschaften am Ende der Anpassung (Quelle: eig. Darstellung) 65
Tab. 5: Sender A0 – tabellarische Übersicht der Nachhallzeiten inkl. Abweichung vom Mittelwert (Quelle: eig. Darstellung) 68
Tab. 6: allgemeine Datenauswertung (Quelle: eig. Darstellung) 106
Tab. 7: Übersicht Stück 1 (Quelle: eig. Darstellung) 107
Tab. 8: Übersicht Stück 2 (Quelle: eig. Darstellung) 107
Tab. 9: Übersicht Stück 3 (Quelle: eig. Darstellung) 108
Tab. 10: Zusammenfassung der Tabellen (Quelle: eig. Darstellung) 108

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS:

Tab.	Tabelle
Abb.	Abbildung
eig.	eigene
lt.	laut
ca.	cirka
sog.	so genannte
inkl.	Inklusive
d.h.	das heißt
vgl.	vergleiche
bzw.	beziehungsweise
usw.	und so weiter
o. ä.	oder ähnlichem
u. a.	unter anderem
hw.	hochwürdigen

c	Schallgeschwindigkeit [m/s]
v	Schallschnelle [m/s]
Hz	Einheit der Frequenz [Hertz]
sec.	Einheit für die Zeit [Sekunde]
λ	Wellenlänge [m]
L_p	Schalldruckpegel [dB]
L_N	Lautstärkepegel [phon]
L_{eq}	äquivalenter Dauerschallpegel [dB]
W	Schalleistung [W]
L_w	Schallleistungspegel [dB]
α	Schallabsorptionsgrad [ ]
ρ	Schallreflexionsgrad [ ]
A	äquivalente Schallabsorptionsfläche [m2]
S	geometrische Fläche [m2]

LITERATURVERZEICHNIS:

[Fas03] W. Fasold; E. Veres; „Schallschutz + Raumakustik in der Praxis“, 2. Auflage, Verlag Bauwesen, 2003

[Mül04] G. Müller; M. Möser; „Taschenbuch der Technischen Akustik“, 3. Auflage, Springer Verlag, 2004

[Rei79] W. Reichardt; „Gute Akustik, aber wie? Gespräche eines Experten für Raumakustik mit Konzert- und Theaterbesuchern, Dirigenten, Schallplattenfreunden, Architekten und Tontechnikern“, 1. Auflage, VEB Verlag Technik, 1979

[Mey03] J. Meyer; „Kirchenakustik“; 1. Auflage, Verlag Erwin Bochinsky, 2003

[Cre78] L.. Cremer, H. Müller; „Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik – Band I“; 2. Auflage, S Hirzel Verlag, 1978

[Cat07] CATT Acoustics v8g; User Manual; „Room Acoustics Prediction and Walkthrough Auralization “; 1. Auflage, Schweden, 2007

[Kir07] M. Stasiowski; G. Frischeis; Kirchenführer; „Pfarr- und Wallfahrtskirche Mariabrunn, Wien 14“; aus dem Buch „Sakrale Kunst in Österreich. Kirchen der Stadt Wien“; Franz R. Vorderwinkler; Steyr, 2007

[Hwa06] J. M. Hwang; „Einfluss der Oberflächengestaltung auf den akustischen Raumeindruck am Beispiel der Wiener Musikvereinssaals“; Diplomarbeit, 2006