Technische Universität Berlin

Studiengang Kommunikationswissenschaft

Analyse und Optimierung der Raumakustik in der Marienkirche zu Prenzlau

Magisterarbeit

vorgelegt von: Verena Brettschneider

Immatrikulationsnummer: [redacted]

Erstprüfer: Prof. Dr. Stefan Weinzierl

Zweitprüfer: Prof. Dr. Michael Möser

Betreuer: Dr.-Ing. Joachim Feldmann

Berlin, den 13.07.2007

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 4

2 Theoretische Grundlagen ... 5

2.1 Nachhallzeit ... 6

2.1.1 Optimale Nachhallzeiten in Kirchen ... 8

2.2 Reflexionsbetrachtungen ... 13

2.2.1 Impulsantwort und ETC ... 15

2.2.2 Energiekriterien C50,C80 und TS ... 16

2.2.3 Sprachverständlichkeit STI und Alcons ... 18

2.2.4 Echokriterium nach Dietsch ... 20

2.3 Kriterien und Entwurfsregeln für eine optimale Raumakustik ... 21

3 Beschreibung, Nutzungsplan und Erfahrungen ... 22

3.1 Beschreibung der Marienkirche ... 22

3.2 Nutzungsplan der Marienkirche ... 23

3.3 Erfahrungen mit der derzeitigen Akustik ... 23

4 Akustische Messungen ... 25

4.1 Durchführung der Messungen ... 25

4.2 Auswertung der akustischen Messungen ... 27

4.2.1 Auswertung der Nachhallzeit ... 28

4.2.2 Bewertung Nachhallzeit ... 29

4.2.3 Zeitliche Energie- und Reflexionsauswertungen ... 31

5 Akustische Computersimulation ... 42

5.1 Simulationsprinzipien der Software ... 43

5.2 Simulation und verwendete Daten ... 45

6 Maßnahmen zur Verbesserung der Raumakustik ... 47

6.1 Ziele der Maßnahmen ... 47

6.1.1 Nachhallzeit ... 48

6.1.2 Direktschallabstrahlung ... 54

6.1.3 Nützliche Reflexionen ... 54

6.1.4 Störende Reflexionen ... 56

6.2 Einzelne Maßnahmen und Anforderungen ... 56

6.2.1 Deckenbereich ... 56

6.2.2 Deckensegel über der Bühne ... 58

6.2.3 Deckensegel seitlich zwischen den Säulen ... 59

6.2.4 Stellwände um Bühne und Auditorium ... 60

6.2.5 Vorhänge ... 61

6.2.6 Polsterstühle 62
6.2.7 Podeste und Treppen auf der Bühne 62
6.3 Ergebnisse der Maßnahmen 63

7 Zusammenfassung 72

8 Literaturverzeichnis 74

9 Tabellenverzeichnis 76

10 Abbildungsverzeichnis 77

11 Anhang 79

Erklärung 84

1 Einleitung

Für die Stadt Prenzlau ist es von großer Bedeutung, dass die Marienkirche als Wahrzeichen der Stadt durch ihre Nutzung auch überregional an Bedeutung gewinnt. Jedoch wird die zurzeit erreichbare Klangqualität bei Musikdarbietungen in der Marienkirche als stark mangelhaft empfunden.

Daher befasst sich die vorliegende Magisterarbeit mit der Raumakustik der Marienkirche zu Prenzlau. Hierfür wurden zunächst akustische Messungen in der Kirche durchgeführt. Deren Ergebnisse werden in dieser Arbeit ausgewertet und erläutert.

Auf Grundlage von Architekturplänen und Absorptionsdaten wird ein akustisches Computersimulationsmodell erstellt, welches mit den erfolgten Messauswertungen abgeglichen wird. Die Computersimulation ermöglicht Maßnahmen in ihrer Wirksamkeit im Voraus zu berechnen.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Konzept zur Optimierung der Kirchenakustik, unter Berücksichtigung des Baustils und des eventuell gegebenen Denkmalschutzes, entwickelt.

Es werden, abhängig von der geplanten Nutzung, Vorschläge für akustische Verbesserungsmaßnahmen ausgearbeitet, die eine Durchführung von musikalischen Veranstaltungen mit angemessener Qualität in der Kirche ermöglichen. Mögliche Ausführungen der Maßnahmen werden dabei erläutert.

Dies geschieht in Absprache mit dem Förderverein Prenzlau, der Kirchengemeinde St. Marien und dem Förderverein „St. Marien“ e.V..

2 Theoretische Grundlagen

Die Raumakustik beschäftigt sich mit der Untersuchung, Charakterisierung und Verbesserung der akustischen Gesamtqualität, der Hörsamkeit des Raumes.

Ihr Ziel ist es, die Hörsamkeit zu optimieren und somit gute Hörverhältnisse für die Zuhörer, ein geeignetes „Arbeitsumfeld“ für die Darbietenden und auch eine angemessene akustische Atmosphäre zu schaffen.

Der Raum als Bindeglied zwischen Sender und Empfänger beeinflusst durch seine Struktur den von der Quelle und seinen Eigenschaften erzeugten Schall und formt das Schallfeld im Raum. Die akustische Qualität eines Raumes ist somit maßgeblich abhängig von seiner Raumgeometrie, der Primärstruktur, und seiner Raumgestaltung, der Sekundärstruktur. Die Primärstruktur umfasst das Raumvolumen, die Raumform und die Anordnung der Bühnen- und Publikumsflächen. Die Sekundärstruktur des Raumes wird bestimmt durch seine Oberflächenmaterialien, deren Flächenstruktur, zusätzliche Einbauten wie Flächen.

Betrachtet man das erzeugte Schallfeld an einem Hörerort, charakterisiert durch die Raumimpulsantwort (Abb. 1), dann setzt es sich zusammen aus Direktschall, Anfangsreflexionen und dem sich aus den späten Reflexionen bildenden Nachhall.

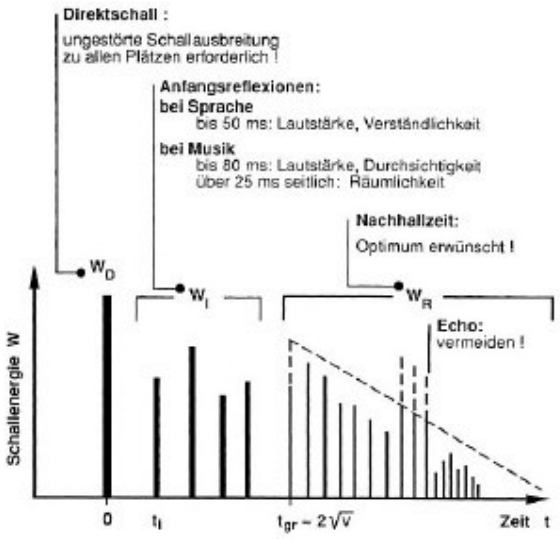


Abb. 1: schematisierte Raumimpulsantwort [Grafik entnommen aus Fasold, 1998, S.149]

Durch Forschungsarbeiten der letzten Jahrzehnte konnten Zusammenhänge zwischen diesen messbaren Schallfeldstrukturen und subjektiven Höreindrücken nachgewiesen und beschrieben werden. Durch Bildung von objektiven Gütemaßen aus diesen Schallfeldparametern und durch Zuordnung dieser Größen zu den, durch Erfahrungen und Untersuchungen gewonnenen funktionsbezogenen Optimalwerten, kann die raumakustische Qualität eines Raumes beurteilt werden. [1]

Diese Größen lassen sich aus der gemessenen Raumimpulsantwort ermitteln und durch statistische Erwartungswerte berechnen.

Als wichtigstes objektives Gütekriterium wäre hier als erstes die Nachhallzeit zu nennen. Doch sie allein, als Merkmal für den gesamten Raum, ist nicht ausreichend. Weitere u.a. platzabhängige objektive Kriterien sind die Energiekriterien Klarheitsmaß, Schwerpunktzeit und Deutlichkeitsmaß sowie auch der Sprachverständlichkeitsindex.

In den nächsten Abschnitten werden die Schallfeldstrukturen näher erläutert und ihre Zusammenhänge mit der akustischen Qualität eines Raumes dargestellt. Die oben genannten Gütekriterien werden im Folgenden beschrieben.

Durch Veränderung der Primär- und Sekundärstruktur des Raumes können die erzeugten Schallfeldstrukturen verändert und somit die Hörsamkeit verbessert werden. In Abschnitt 2.3 werden die hierfür grundlegenden zu beachtenden Kriterien und Planungsziele noch einmal zusammengefasst. Die Veränderung dieser Kriterien spiegelt sich in den objektiven Gütemaßen wieder.

2.1 Nachhallzeit

Der Nachhall eines Raumes ist das auffälligste Charakteristikum der Akustik eines Raumes. Es ist das bisher am meisten untersuchte Merkmal und es gibt mehrere Ansätze, den subjektiv empfundenen Nachhall und dessen Einfluss auf die Hörsamkeit des Raumes zu definieren, zu messen und zu berechnen.

Die als erstes von W. C. Sabine definierte und bis heute immer noch wichtigste und aussagekräftigste Kenngröße ist die Nachhallzeit.

Die Nachhallzeit kennzeichnet diejenige Zeit, in der die Schallenergie im eingeschwungenen Zustand des Raumes nach Abschalten der Schallquelle auf den millionsten Teil, d.h. um 60 dB gefallen ist.

---

[1] Es sei hierbei angemerkt, dass die Wahrnehmung des Hörereignisses neben diesen Kriterien auch subjektiven Einflüssen unterliegt, so zum Beispiel optische und akustische Erwartungshaltung und Hörgewohnheiten oder unterschiedliche akustische Erfahrungen und Ansprüche an den Raum.

Die Nachhallzeit ist eine statistische Angabe und beschreibt ein Merkmal des gesamten Raumes, sie sagt jedoch wenig über die spezifischen Eigenschaften eines Hörerplatzes aus. Die Nachhallzeit ist frequenzabhängig. Sie wird teilweise auch zur einfachen und schnellen Beurteilung oder für Vergleiche als Einzahlwert angegeben. Dann handelt es sich oft um eine Mittelung über alle Frequenzoktavbänder oder um die Nachhallzeit bei mittleren Frequenzen.

Die Nachhallzeit wird aus der gemessenen Abklingkurve des Schalldruckpegels zwischen den Pegelwerten –5 dB und –35 dB unter dem Anfangspegel ermittelt. Eine Auswertung bis –60 dB ist zumeist nicht möglich, da der Nachhall vorher im meist vorhandenen Störpegel verschwindet.

Die von Sabine gefundene Abhängigkeit der Nachhallzeit T von deren Volumen V und der in ihr befindlichen Absorption formulierte er in der heute nach ihm benannten Nachhallformel:

$$T_{Sabine} = 0{,}163 \frac{V}{A_{ges}} \qquad [s] \qquad \text{Gl. 1}$$

Die gesamte äquivalente Absorptionsfläche A setzt sich zusammen aus der Summe aller Flächen S multiplizeirt mit ihrem jeweiligen Schallabsorptionsgrad α und der Schalldämpfung der Luft mit ihrer Energiedämpfungskonstante m:

$$A_{ges} = \sum S\alpha + 4mV$$

Die Nachhallformel nach Sabine gilt für einfache Raumgeometrien (keine Verwinkelung, Flachräume oder Tunnel) und eine gleichmäßige Verteilung der Absorption im Raum.

Sie liefert für Räume mit geringer bis mittlerer Absorption (α_{Raum} bis ca. 0,3) eine ausreichende Genauigkeit. Steigt die Gesamtabsorption des Raumes, werden die Werte immer fragwürdiger.

C. F. Eyring formulierte die Nachhallformel dahingehend, dass die Nachhallzeit für Fälle höherer bis vollständiger Absorption genauere Ergebnisse liefert. Für geringe Absorptionsgrade gehen die Ergebnisse der Eyring'schen Nachhallformel in die der Sabin'schen Formel über.

$$T_{Eyrinr} = 0{,}163 \frac{V}{-\ln(1 - a_{Raum}) S_{ges}} = 0{,}163 \frac{V}{-\ln(1-\alpha_{Raum}) S + 4mV} \quad [s] \qquad \text{Gl. 2}$$

Eine weitere Nachhallformel ist die nach Fitzroy, welche die Verteilung der Absorption in allen drei Raumrichtungen berücksichtigt. Bei gleichmäßiger Absorptionsverteilung entspricht die Nachhallformel nach Fitzroy der Sabin'schen Nachhallformel.

$$T_{Fitzroy} = \frac{s_x}{S}\left(\frac{0{,}163 \cdot V}{S\overline{a_x}}\right) + \frac{s_y}{S}\left(\frac{0{,}163 \cdot V}{S\overline{a_y}}\right) + \frac{s_z}{S}\left(\frac{0{,}163 \cdot V}{S\overline{a_z}}\right) \quad [s] \qquad \text{Gl. 3}$$

Aufgrund der in der Marienkirche vorhandenen Bedingungen, großes Volumen und geringe Absorption, wird vorrangig die Sabin'sche Nachhallformel verwendet.

Die Nachhallzeit ist eine statistische Betrachtungsweise, sie sagt jedoch wenig über die spezifischen Eigenschaften eines Hörerplatzes aus.

Weitere objektive Kriterien beschreiben die Unterschiede zwischen den einzelnen Hörerplätzen im Wesentlichen durch die unterschiedlichen Einflüsse der Reflexionen bezüglich Anhall, Stärke, Zeitdifferenzen und Richtung bis zum Einsatz des Nachhalls. „Durch Bildung bestimmter Energiesummen, Energieverhältnisse, Zeitgrenzen, Richtungsabhängigkeiten des eintreffenden Schalls oder Bestimmung der Zeitableitung von Energiesummen (Anstiege) werden die verschiedenen Kriterien definiert.“ [Fasold 1976, S.30]

2.1.1 Optimale Nachhallzeiten in Kirchen

Die optimale Nachhallzeit richtet sich nach dem Raumvolumen und nach der Art der Raumnutzung (Sprache, Musik, Kammermusik, Kirchenmusik, Orgelmusik).

Die Nachhallzeit ist neben dem Volumen auch im entscheidenden Maße von Absorption im Raum abhängig. Ein „unvermeidbarer“ Anteil der Absorption wird immer durch Personen in den Raum eingebracht. Daher ist die zu erwartende Anzahl der Personen eine entscheidende Größe für die Abschätzung der erzielbaren Nachhallzeit. Hierfür kann man die Volumenkennzahl heranziehen. Diese kennzeichnet das verfügbare Volumen pro Person. Wenn die Volumenkennzahl zu klein ist, fällt die erreichbare Nachhallzeit zu kurz aus. Eine

zu hohe Volumenkennzahl ist weniger kritisch, da durch Absorptionsmaßnahmen in einem gewissen Rahmen sich die Nachhallzeit senken lässt.

Eine Beschränkung besteht darin, dass mit Zunahme der äquivalenten Schallabsorptionsfläche aufgrund der verringerten Schallenergiedichte kein ausreichender Schalldruckpegel mehr erzielt werden kann. [vgl. Fasold 1998, S.142 siehe auch Fasold 1984, S.1233]

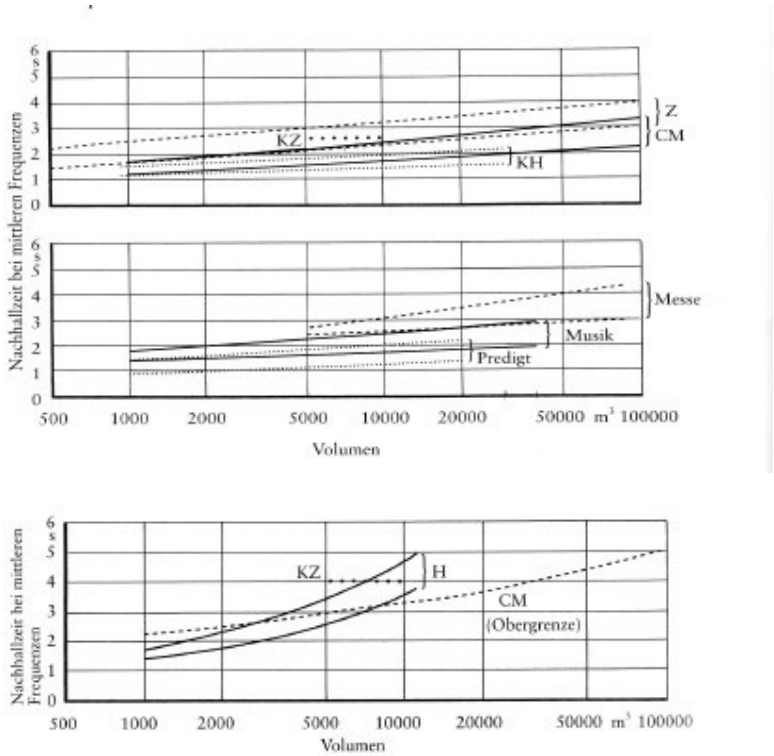
Richtwerte für verschiedene Nutzungen haben sich etabliert und sind in der Literatur zu finden. Spezielle Angaben für Kirchen gibt es nicht. Die empfohlenen Volumenkennzahlen sind funktionsbezogen. Für Konzertsäle für sinfonische Musik beträgt die empfohlene Volumenkennzahl 8 bis 12 m³ pro Platz, die für Räume für Orgelmusik 10 bis 14 m³ pro Platz. [vgl. Fasold 1998, S. 142]

Für die Bewertung der optimalen Nachhallzeit von Kirchen wurden bisher wenige Untersuchungen durchgeführt. Bei den Angaben in der Literatur setzen die Autoren unterschiedliche Schwerpunkte, wie zum Beispiel in Bezug auf die Nutzungsart (Predigt, Musikaufführungen, Orgel) oder stützen sich auf die Befragung verschiedener Personengruppen (Musiker, Gemeindemitglieder, Orgelbauer, Tontechniker). Bei benannten Personengruppen ist davon auszugehen, dass sie unterschiedliche Erwartungen und Ansprüche an den Kirchenraum stellen. Die gefundenen Angaben beziehen sich auf den unbesetzten oder auf den besetzten Zustand des Kirchenraumes. Oft werden Angaben für die optimale Nachhallzeit nur bis zu einem Volumen von 20000 m³ gegeben.

So liegen die empfohlenen Nachhallzeiten für Kirchenräume, je nach Herangehensweise und Sichtweise der Autoren, in breit gestreuten Bereichen. Jürgen Meyer fasst in seinem Buch „Kirchenakustik“ die verschiedenen Angaben zu den empfohlenen Nachhallzeiten zusammen. Durch seine Untersuchungen, die sich auf ca. 70 Kirchen stützen, und die Aspekte der stiltypischen Nachhallzeiten verschiedener Epochen mit einbeziehen, formuliert er eigene Empfehlungen für optimale Nachhallzeiten in Kirchen. Er bezieht sich dabei auf den unbesetzten Zustand und zeigt den Einfluss auf die Nachhallzeit bei Besetzungsgraden von 5 bis 15 m³ pro Person.

In Abb. 2 sind die empfohlenen Nachhallzeiten verschiedener Autoren zu sehen.

Abb. 3 zeigt die von Meyer empfohlene Nachhallzeit für leere Kirchen, sowie die stiltypische Nachhallzeit gotischer Kirchen. Abb. 4 stellt den von Meyer angegebenen optimalen Nachhallzeitenbereich im besetzten Zustand dar.



CM: Cremer 1978

Z: Zorkoczy 1976

KH: Knudsen 1950

KZ: Kaufmann 1996

H: Hartmann 1986

mittlere Teilbild nach Thienhaus 1962

Abb. 2: empfohlener Nachhallzeitenbereich für Kirchen nach verschiedenen Autoren; oben und mittlere Grafik: für besetzte Kirchen, untere Grafik: für unbesetzte Kirchen [entnommen aus Meyer 2003, S.144]

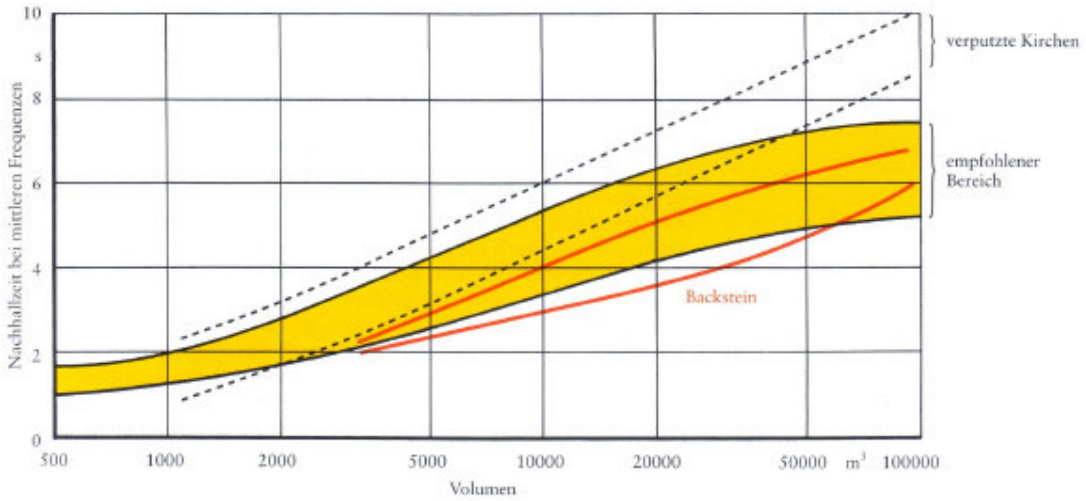


Abb. 3: Vergleich der empfohlenen Nachhallzeit von Meyer und die stiltypische Bereiche gotischer Kirchen [entnommen aus Meyer 2003, S. 152]

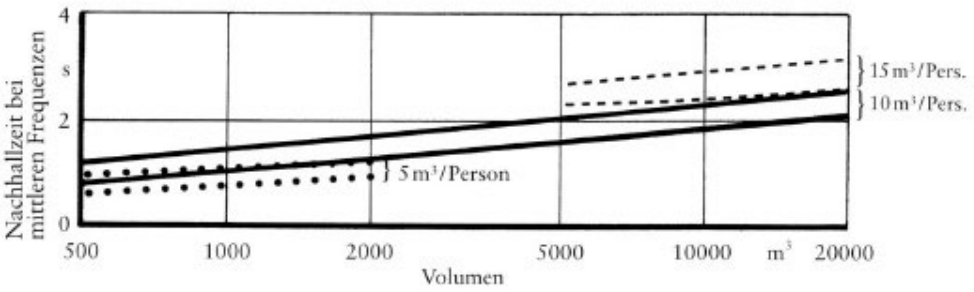


Abb. 4: Einfluss unterschiedlicher Besetzungsdichte auf die empfohlene Nachhallzeit in unbesetzten Kirchen (nach Abb. 3) [entnommen aus Meyer 2003, S.148]

Wenn die Nachhallzeit nicht der Nutzungsfunktion des Raumes angepasst ist, hat dies für Sprache und Musik verschiedene Auswirkungen. Bei Sprache führt eine zu lange Nachhallzeit dazu, dass durch den langen Abklingvorgang die nachfolgenden Silben durch die früher gesprochenen Silben verdeckt werden und somit schlechter oder gar nicht mehr verstanden werden. Bei Musik kommt es vor allem bei tiefen Frequenzen zu einem Verschmelzen der Töne, so dass ein „mulmiger“ Musikeindruck entsteht.

Aus der Tatsache, dass für Sprache eher geringere Nachhallzeiten optimal sind als für Musik, zeigt sich, dass eine Nachhallzeit, die für beide Nutzungen optimal ist, nicht möglich ist. Hier muss entweder einer Nutzung und der damit verbundenen optimalen Nachhallzeit der Vorzug gegeben werden oder ein Kompromiss zwischen beiden Werten eingestellt werden.

Ebenfalls sollte auch die Hörerwartung nicht vernachlässigt werden. Beim Betreten eines großen Raumes erwartet man unbewusst auch einen langen Nachhall. Wenn dieser von der Erwartung stark abweicht, wird dies als unnatürlich empfunden.

Hinsichtlich der Anforderungen an den optimalen Frequenzverlauf der Nachhallzeit findet man in der Literatur verschieden Aussagen.

Allgemein wird empfohlen, dass bei musikalischen Darbietungen eine längere Nachhallzeit zu den tiefen Frequenzen wünschenswert ist. Dies gleicht die geringere Empfindlichkeit des Gehörs bei tiefen Frequenzen aus und verleiht der Musik „Wärme“ und „Fülle“. [vgl. Fasold 1984, S. 1264, siehe auch Fasold 98, S.138]

Für Sprachdarbietungen ist eher ein Abfall zu den tiefen Frequenzen vorteilhaft, da hierdurch die für die Sprachverständlichkeit wichtigen mittleren und hohen Frequenzen weniger durch die tiefen Frequenzen verdeckt werden.

Ein Kriterium für das Verhältnis der Nachhallzeit von tiefen Frequenzen zu den mittleren ist das Bassverhältnis BR. Für Konzertsäle werden Werte von etwa 1,1 bis 1,3 empfohlen, wobei die untere Grenze eher für Säle mit höheren Nachhallzeiten und die obere Grenze für Säle mit niedrigeren Nachhallzeiten günstig ist.[vgl. Fasold 1998, S. 138]

Spezielle Aussagen für den optimalen Nachhallverlauf bei Kirchen werden weniger genannt.

Zorkoczy beschreibt, dass eine zu lange Nachhallzeit bei den tiefen Frequenzen im Vergleich zu den mittleren und hohen Frequenzen zu einem „unangenehmen Kellerklang“ führen kann. „Ist die Nachhallzeit bei den Tiefen ähnlich kurz wie bei den Höhen, verglichen mit den mittleren Frequenzen, so kann das unter Umständen zu einem etwas farblosen Gesamtklang – ohne Fülle in der Basslage – führen.“ [Zorkoczy 1976, S.16]

„Thienhaus verweist lediglich darauf, dass der liturgische Gesang sowie Chor- und Orgelmusik einen „größeren Nachhall vor allem für tiefere Frequenzen“ verlange.“ [Meyer 2003, S. 145]

Meyer wertet die von ihm vorgenommenen Untersuchungen bei Kirchen auch hinsichtlich des Nachhallverlaufes zu tiefen Frequenzen aus und gibt ebenfalls Empfehlungen für die Frequenzcharakteristik des Nachhalls.

Für eher halligere Kirchen kommt er zu dem Ergebnis, dass „der Absolutwert der Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen [...] offenbar wichtiger für die Beurteilung der Räume ist als die Frage, ob dieser Nachhallwert mit einem höheren, gleich hohen oder niedrigeren Wert bei mittleren Frequenzen kombiniert wird.“[MEY 03, S. 147]

Weiterhin zeigten seine Untersuchungen, dass ein zu starker Anstieg der tiefen Frequenzen trotz optimaler Nachhallzeit zu einer als zu lang empfundenen Nachhallzeit führen kann. Umgekehrt „darf [man] die Grenze etwas höher ansetzen, wenn die Nachhallzeit von der Mittellage zu den Tiefen absinkt.“ [MEY 03, S. 147]

Unter dem Aspekt, dass starke tieffrequente Klanganteile die für die Deutlichkeit und Brillianz wichtigen höheren Frequenzen verdecken, empfiehlt Meyer „einer zu tiefen Frequenzen hin abfallenden Nachhallkurve gegenüber einem Anstieg [den] Vorzug zu geben“ [Meyer 2003, S. 154] Er bezieht sich dabei auf den unbesetzten Zustand.

Durch anwesende Personen, welche vorwiegend mittlere und hohe Frequenzen absorbieren, nimmt die Steilheit des Tiefenanstieges mit wachsender Besucherzahl wieder zu.

Die zum Teil unterschiedlichen Autorenempfehlungen für den Nachhallverlauf in Kirchen könnten an den verschiedenen Annahmen für die Nutzungsarten liegen.

2.2 Reflexionsbetrachtungen

Wie bereits geschrieben, ist die Nachhallzeit nicht allein bestimmend dafür, ob die Akustik oder ein Hörerplatz als gut befunden wird.

Für eine gute Hörsamkeit, besonders bei der Beurteilung der einzelnen Plätze, ist auch zu einem hohen Maße die zeitliche und räumliche Struktur der Schallrückwürfe entscheidend.

Man unterscheidet hinsichtlich der zeitlichen Struktur zwischen Direktschall, frühen und späten Reflexionen. Hierbei hat sich gezeigt, dass es besonders die frühen Schallrückwürfe sind, die den Höreindruck und die Hörsamkeit maßgeblich beeinflussen. Wenn sie für die Hörsamkeit förderlich sind bezeichnet man sie gemeinhin als „nützliche“ Reflexionen. Dies bedeutet aber nicht, dass späte Reflexionen als störend einzuordnen sind. Besonders für die Musik ist auch ein gewisses Maß an Halligkeit und Räumlichkeit erforderlich, um sie klingen zu lassen.

Für die praktische Raumakustik ist es also wichtig zu wissen, welche Reflexionen zu den nützlichen gezählt werden können sowie welche Merkmale ein Schallrückwurf hat, der sich störend bemerkbar macht.

Ein Hauptmerkmal zur Unterscheidung ist der Laufzeitunterschied zwischen Direktschall und Schallrückwurf. Als Übergangsbereich kann die Verwischungsschwelle angesehen werden. Diese verhält sich für Sprache anders als für Musik.

Für Sprache stellt die Verwischungsschwelle eine markante Grenze dar, oberhalb derer eine Verständlichkeitsminderung eintritt. Bei Sprache liegt die Verwischungsschwelle zwischen 30 ms bis 100ms. Dies ist abhängig von der Pegeldifferenz des Direkt- und Folgeschalls, der Nachhallzeit und der Sprechgeschwindigkeit. Für praktische Zwecke hat sich als Mittelwert 50 ms bewährt. [vgl. Fasold 1998, S.52]

„Bei Musik ist eine Verwischungsschwelle als Zeitgrenze störender Reflexionen weniger ausgeprägt. Sie wird von vielen anderen, auch subjektiven Faktoren beeinflusst. Als Grenze zwischen Reflexionen, durch die Klarheit und Durchsichtigkeit der Musik gefördert werden, und solchen, die zu größerer Räumlichkeit der Schallwahrnehmung beitragen, wird bei der Planung mit 80 ms gerechnet.“[Fasold 1998. S. 52]

Man kann also feststellen, dass Reflexionen bis zur jeweiligen Schwelle, sich verständlichkeitsfördernd auf Sprache auswirken und für Musik die Durchsichtigkeit der musikalischen Struktur verbessert. Bei Sprache können Reflexionen nach der Verwischungsschwelle zur Verminderung der Sprachverständlichkeit führen. Bei Musik haben die Reflexionen nach der Verwischungsschwelle vor allem eine Erhöhung der Räumlichkeit zur Folge. Für die Wahrnehmung der Räumlichkeit und des „Eingehülltsein“ spielen vor allem aber auch die Reflexionen eine Rolle, die den Hörer von der Seite erreichen.

Hier hat sich gezeigt, dass besonders seitliche Reflexionen mit einer Verzögerung von 25 ms bis 80 ms den Eindruck der Räumlichkeit verstärken. [Fasold 1976, S. 35] „Diese trägt mehr noch als die Halligkeit zum Raumeindruck bei.“ [Fasold 1998, S. 150]

„Im Gegensatz zu den Kriterien für die Sprachverständlichkeit geht es bei der Durchsichtigkeit der Musik nicht um die Einhaltung eines Grenzbereiches, sondern um das Gebiet optimaler Werte, denn die Durchsichtigkeit darf natürlich nicht zu groß werden. Es muss eine Ausgewogenheit zwischen frühen (bis etwa 80 ms) und späteren, stärker diffusen Reflexionen, erreicht werden. Die letzteren Tragen zu Raumeindruck bei, bewirken ein Gefühl des „Eingehülltseins“ in Musik, der Halligkeit, und das ist für ein Konzerterlebnis gleichermaßen bedeutsam.“ [Fasold 1998, S. 151]

Für die Beurteilung, wann sich ein Schallrückwurf als störend erweist, ist nicht allein die Zeit- und Pegeldifferenz zum Direktschall ausschlaggebend. Die verzögerte Reflexion muss auch einen ausreichend starken Pegel besitzen und den allgemein abfallenden Nachhall übersteigen, um in Erscheinung zu treten.

Eine Orientierung für die Beurteilung, ob ein Schallrückwurf als störend empfunden wird ist in Abb. 5 zu sehen. Diese Pegeldifferenzen beziehen sich auf Versuche im reflexionsarmen Raum, also ohne Nachhall. [vgl. Hartmann 1968, S.38] Die Grafik verdeutlicht auch noch einmal den Aspekt der nützlichen Reflexionen.

Aus Abb. 5 ist erkennbar, dass Schallrückwürfe bis ca. 30 ms genauso laut sein können wie der Direktschall. Untersuchungen haben sogar ergeben, dass die Intensität des Schallrückwurfes bei einer Laufzeitdifferenz zwischen 10 ms und 30 ms sogar lauter sein kann, ohne dass ein Hörer sein Vorhandensein bemerkt. [vgl. Hartmann 1968, S.40, siehe auch Cremer 1978, S. 397] Dieser Effekt kann auf die Ohrträgheit zurückgeführt werden. Er kann sogar bis 10 dB lauter sein, um eine Erhöhung der Lautstärke des Direktschalls zu bewirken ohne ein Richtungsänderung der Quellenortung wahrzunehmen. Dies ist auch als Haas-Effekt bekannt. [vgl. Fasold 1998, S. 56, siehe auch Cremer 1978]

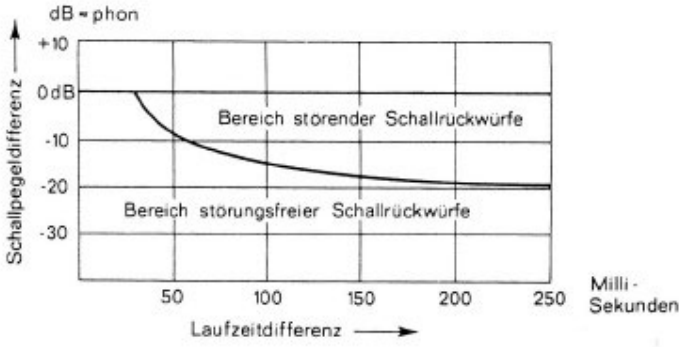


Abb. 5: Grenze zwischen nicht störenden und störenden einzelnen Schallrückwurf [entnommen aus Hartmann 1968, S. 40]

Eine Reflexion kann also erst als störend angesehen werden, wenn sie nach einer Grenzzeit von ca. 30 ms den allgemeinen abfallenden Nachhall überragt und dabei eine gewisse Intensität erreicht.

Wenn eine Laufzeitdifferenz von 100 ms überschritten wird, wird die störende Reflexion als Echo wahrgenommen.

Auch eine Folge von schwächeren Echos kann sehr störend sein. Diese Echofolgen nennt man Flatterechos. Sie werden hervorgerufen, wenn die Schallenergie zwischen zwei parallelen Flächen hin- und her geworfen wird.

Zur Untersuchung der Impulsantwort auf das Reflexionsverhalten kann das Energie-Zeit-Diagramm (ETC, engl. energy time curve) oder die Impulsantwort betrachtet werden. Das Echokriterium nach Dietsch wertet die Impulsantwort auf eine Echogefahr für Sprache oder Musik aus. Die Energiekriterien Schwerpunktzeit, Klarheitsmaß und Deutlichkeitsmaß bewerten das Verhältnis von anfänglicher zu später Schallenergie, jeweils mit unterschiedlichen Zeitgrenzen. Diese Kriterien lassen sich im Falle eines rein exponentiellen Nachhalls durch dessen Nachhallzeit ausdrücken. Sie sind also auch unter praktischen Gegebenheiten mit der Nachhallzeit hoch korreliert. [vgl. Cremer 1978, S. 348]

Zwei weitere Kriterien speziell zur Beurteilung der Sprachverständlichkeit sind der Sprachübertragungsindex und der Artikulationsverlust von Konsonanten. Sie leiteten sich aus der messtechnischen Entwicklung ab.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Kriterien näher erläutert.

2.2.1 Impulsantwort und ETC

Mit der gemessenen Impulsantwort kann das Systemverhalten des Raumes vollständig beschrieben werden. Hieraus können auch alle weiteren Maße wie zum Beispiel Nachhallzeit, Energiekriterien und STI abgeleitet werden.

Anhand der Impulsantwort oder der Darstellung dieser als ETC-Diagramm kann auch das Reflexionsverhalten des Raumes untersucht werden. Hieraus können Zeit- und Pegeldifferenzen einzelner Reflexionen abgelesen werden.

2.2.2 Energiekriterien C50,C80 und TS

Zu den Energiekriterien, die eine Bewertung aufgrund der zeitlichen Verteilung der Schallenergie über der Zeit vornehmen, gehören die Schwerpunktzeit TS, das Klarheitsmaß C80 und das Deutlichkeitsmaß C50. Für die Abschätzung von Erwartungswerten können statistische Berechnungen aufgrund von Hallradius und Nachhallzeit vorgenommen werden.

Schwerpunktzeit TS

Die Schwerpunktzeit nach Kürer kennzeichnet diejenige Zeit, in der die angekommende Schallenergie bis zum Zeitpunkt TS, gleich der noch folgenden Schallenergie nach TS entspricht.

$$TS = \frac{\int_0^\infty t \cdot p^2(t)dt}{\int_0^\infty p^2(t)dt} \; [ms] \qquad \text{Gl.4}$$

Sie markiert, im Gegensatz zu anderen Energiekriterien, keine scharfe Zeitgrenze zwischen frühen und späten Reflexionen und entspricht daher eher der tatsächlichen Schallwirkung. [vgl. Fasold 1976, S. 150]

Die Schwerpunktzeit kann sowohl zur Beurteilung von Sprache als auch von Musik herangezogen werden. Kürer hat die Eignung dieses Kriteriums zur quantitativen Erfassung der für Deutlichkeit und Klarheit günstiger Gegebenheiten unter Beweis gestellt. [vgl. Cremer 1978, S.415]

Die Abhängigkeit der Silbenverständlichkeit von der Schwerpunktzeit erwies sich laut Kürer als besser, als die Abhängigkeit von der early decay time oder vom Deutlichkeitsgrad [Cremer 1978, S.416]

Optimalwerte der Schwerpunktzeit liegen für Sprache bei weniger als 80 ms. Die Optimalwerte der Schwerpunktzeit für sinfonische Musik und Chorsinfonik liegen bei 100 ms bis 150 ms. [vgl. Fasold 1998, S. 136] Während es für die Sprache eher um die Einhaltung eines Grenzwertes geht, so kommt es bei der Musik eher auf die Ausgewogenheit zwischen

Durchsichtigkeit (frühe Reflexionen) und Raumeindruck (späte diffuse Reflexionen) an und somit um einen Bereich optimaler Werte.

„Die Schwerpunktzeit kann auch als Indikator dafür sein„ ob die Energie zeitliche „breit verschmiert“, d.h. teilweise verzögert eintrifft, was bei Musik eher akzeptabel oder sogar erwünscht ist (weicher Klangeinsatz), während bei Sprache eine Stärkere zeitliche Konzentration vorteilhaft ist (harter Klangeinsatz)“ [Easera-Tutorial, S. 126]

Klarheitsmaß

Das Klarheitsmaß C_{80} kann zur Bewertung der Durchsichtigkeit musikalischer Strukturen herangezogen werden.

Das Klarheitsmaß bewertet das Verhältnis der bis 80 ms eintreffenden Schallenergie zu der nach 80 ms folgenden Schallenergie.

$$C_{80} = 10 \lg \frac{\int_{0}^{80\,ms} p^2(t)\,dt}{\int_{80\,ms}^{\infty} p^2(t)\,dt} \; [dB] \qquad \text{Gl. 5}$$

Ein Klarheitsmaß von 0 dB bedeutet, dass in der Zeitspanne bis 80 ms genauso viel Schallenergie am Platz eintrifft wie in der Zeit nach 80 ms. Ein Klarheitsmaß von 3 dB zeigt an, dass bis 80 ms doppelt soviel Schallenergie am Platz eintrifft wie nach 80 ms. Wenn in der Zeitspanne bis 80 ms nur halb soviel Schallenergie am Platz eintrifft wie danach, dann entspräche dies einem Klarheitsmaß von – 3 dB.

Für Angaben optimaler Werte findet man in der Literatur unterschiedliche Grenzwerte und Einteilungen, je nachdem, ob sich der Autor zum Beispiel auf den Musikstil bezieht oder eine Einteilung für vordere und hintere Plätze vornimmt.

Für Konzertsäle können Werte von – 2 bis + 4 dB als gut angesehen werden, besser sind –2 bis +1 dB, für entferntere Plätze sind –5 dB vertretbar. [vgl. Meyer 2003, S. 53] Der von Fasold genannte optimale Bereich liegt bei –1 bis +3 dB. [vgl. Fasold 1998, S. 136] Für die Bewertung von Kirchen gibt es keine umfassenden Erkenntnisse. Es können jedoch geringere Werte als raumtypisch akzeptiert werden. [vgl. Meyer 2003, S. 53]

Deutlichkeitsmaß

Das Deutlichkeitsmaß nach Ahnert kann zur Beurteilung der Durchsichtigkeit sprachlicher Strukturen herangezogen werden und bewertet die Silbenverständlichkeit.

Das Deutlichkeitsmaß setzt, wie das Klarheitsmaß, die zeitigen Reflexionen zu den späteren Reflexionen ins Verhältnis. Die Zeitgrenze liegt hier bei 50 ms. „Mit [...] einem Deutlichkeitsmaß C50>0dB werden sehr gute Silbenverständlichkeiten von mehr als 70 % gewährleistet.“ [Fasold 1998, S. 150]

$$C_{50} = 10 \lg \frac{\int_{0}^{50ms} p^2(t)dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t)dt} \; [dB] \qquad \text{Gl. 6}$$

2.2.3 Sprachverständlichkeit STI und Alcons

Bei dem Messverfahren des Sprachübertragungsindexes STI (Speech Transmission Index STI), wird der Modulationsverlust des Schallsignals auf einer Übertragungsstrecke bewertet.

Hierbei werden die Signale der Frequenzen 125 Hz bis 8 kHz mit Frequenzen zwischen 0.63 Hz und 12,5 Hz moduliert. Bei der Übertragung im Raum treten durch Nachhall, Echos oder Geräusche Modulationsverluste auf. Das Verhältnis vom Modulationsgrad am Hörerort zum Modulationsgrad des anregenden Signals ergibt dann die Modulations-Übertragungsfunktion m(F). In EASERA werden nach Schröder alle Modulationsgrade aus der Impulsantwort abgeleitet. [vgl. EASERA-Tutorial]

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2 p F \frac{T}{13,8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{-\frac{S}{N} \cdot \frac{1}{10}}} \qquad \text{Gl. 7}$$

mit Modulationsfrequenz F des Signals, Nachhallzeit T der Messposition, Signalpegel S und Störgeräuschpegel N

Das Beurteilungskriterium der Alcons-Werte (engl. Artikulation loss of Consonants) von V.M.A. Peutz ist ein Verfahren zur Berechnung des Konsonantenverlustes. Dieser wertet insbesondere das Verhältnis der empfangenen Direktschallenergie zu dem raumakustisch bedingten Diffusfeld aus.

$$Al_{cons} = \frac{200\, s^2\, T^2\, N}{V\, \gamma} \qquad [\%] \qquad \text{Gl. 8}$$

$$Al_{cons} \approx 0{,}65 \left(\frac{s}{r_H} \right)^2 T \qquad r_H = 0{,}057 \sqrt{\gamma} \sqrt{\frac{V}{T}}$$

mit Entfernung s zwischen Quelle und Empfangsort, Nachhallzeit T, Kopplungsfaktor N der Quellen, Volumen V, Bündelungsgrad γ und Hallradius r_H

Untersuchungen zwischen den Ergebnissen der Alcons und STI-Bewertung ergaben eine Korrelation beider Kriterien. Sie lassen sich ineinander überführen. Die Bewertung der STI- und Alcons-Werte sind in Tab. 1 abzulesen.

Die Zusammenhänge gelten für ausreichend große Signalgeräuschabstände (> 25 dB). Durch Störgeräusche wird die erzielbaren Verständlichkeit STI reduziert.

Tab. 1: Bewertung der Werte für STI und Alcons

STI	**Alcons**	**Bewertung**
1,0 ... 0,75	0 % ... 3 %	exzellente Verständlichkeit
0,75 ... 0,6	3 % ... 7 %	gute Sprachverständlichkeit
0,6 ... 0,5	7 % ... 10 %	befriedigende Verständlichkeit
0,5 ... 0,45	10 % ... 15 %	ausreichende Verständlichkeit
0,45 ... 0,3	15 % ... 30 %	stark eingeschränkte Verständlichkeit, gemeinhin ausreichend für deutlich prononcierte einfache Informationen
< 0,3	> 30 %	Verständlichkeit erheblich gestört, weitgehend unmöglich.

2.2.4 Echokriterium nach Dietsch

Für das Auftreten eines Echos gibt es auch ein objektives Kriterium, bei dem für eine definierte Größe geprüft wird, ob sich ihr Wert in Zeitschritten sprunghaft ändert. Dann besteht die Gefahr eines hörbaren Echos. Dieses Gütemaß ist das Echokriterium nach Dietsch.

Die Berechnung des Echokriteriums nach Dietsch aus der Raumimpulsantwort erfolgt in folgender Weise:

$$EK_{Sprache} = \frac{\Delta t_S(t)}{\Delta t_E} \qquad \text{Gl. 9}$$

$$t_S(\tau) = \frac{\int_0^t t \cdot |p(t)|^n \, dt}{\int_0^t |p(t)|^n \, dt} \qquad \text{Gl. 10}$$

<u>für Sprache mit folgenden Werten [EASERA-Appendix]:</u>

$\Delta\tau_E = 9$ ms

$n = 2/3$ $\qquad EK_{grenz} = 1$

<u>für Musik mit folgenden Werten [EASERA-Appendix]:</u>

$\Delta\tau_E = 14$ ms

$n = 1$

$EK_{Musik,grenz} = 1{,}8$ bis 2 für Mozart (kritischstes Motiv)

$EK_{Musik,grenz} = 3$ für Pianomusik

$EK_{Musik,grenz} = 7$ für „tragende“ Musik wie z.B. Wagner

Ein Echo tritt auf, wenn $EK_{max} > EK_{grenz}$ ist. Tritt $EK_{max} > EK_{grenz}$ periodisch auf (50ms bei Sprache, 80 ms bis 100 ms bei Musik), dann wird ein Flatterecho hörbar.

2.3 Kriterien und Entwurfsregeln für eine optimale Raumakustik

Aus den in den Abschnitten 2.1 und 2.2 genannten Zusammenhängen lassen sich für den Entwurf von raumakustischen Planungen und der Erzielung einer optimalen Hörsamkeit folgende zu beachtende Kriterien formulieren, welche hier noch einmal zusammengefasst werden sollen. [vgl. Fasold 1976, S. 35]

Es sollte eine ausreichende Direktschallenergie vorhanden sein. Die Direktschallenergie sollte die Hörerplätze ungestört erreichen. Sie sollte wenn nötig durch kurzzeitige Reflexionen bis ca. 30 ms unterstützt werden. Frühe Reflexionen, für Sprache bis etwa 50 ms und für Musik bis 80 ms, verbessern die Durchsichtigkeit, d.h. die Deutlichkeit der Sprache und die Klarheit der Musik. Seitlich einfallende Reflexionen zwischen 25 ms und 80 ms erhöhen die Räumlichkeit und sind besonders für Musikdarbietungen wichtig. Diffus einfallende Reflexionen mit abnehmender Intensität nach 80 ms erhöhen den Raumeindruck. Der Raum sollte eine der Nutzungsart und Raumgröße angepasste Nachhallenergie haben. Störende Reflexionen, die Echostörungen oder Fehlortungen erzeugen, das Klangbild verfärben oder beeinträchtigen, sind zu vermeiden.

Ebenfalls sollte eine möglichst gleichmäßige Schallversorgung, mittels eben genannter Kriterien, für alle Plätze gegeben sein.

Durch die objektiven messbaren Gütemaße, wie Nachhallzeit, Sprachverständlichkeit, Klarheitsmaß etc. können diese Anforderungen hinsichtlich ihrer Erfüllung beurteilt werden.

3 Beschreibung, Nutzungsplan und Erfahrungen

3.1 Beschreibung der Marienkirche

Die gotische Hallenkirche wurde im 13. Jahrhundert errichtet. Sie brannte im 2. Weltkrieg bei einem Feuersturm bis auf die Grundmauern nieder. Der Grundbau wurde in den siebziger Jahren wieder aufgebaut.

Die sanierten Umfassungswände sind in ungeputztem Ziegelmauerwerk, mit Maßwerkfenster mit Bleiverglasung. Der Ziegelboden ist vom Westwerk zum Ostwerk mit ansteigendem Niveau. Die 3-schiffige Hallenkirche ist unterteilt durch zwei Pfeilerreihen mit aufgesetzten Gurtbogen-Arkaden und Gewölbeansätzen. Die ursprüngliche Kreuzgewölbe-Decke wurde nicht rekonstruiert und wird voraussichtlich auch in den nächsten Jahren und Jahrzehnten nicht wieder aufgebaut werden. Daher ist der gesamte Raum bis zum Satteldach offen. Die Dachkonstruktion ist aus Stahl mit Holzschalung und Kupferblechdeckung.

Die Kirche ist ca. 25 m breit, 55 m lang, hat eine Wandhöhe von ca. 23 m und die Höhe des Satteldaches beträgt etwa 21 m. Das Volumen des Kirchenraumes beträgt etwa 45000 m³.

In Abb. 6 werden Fotos des Kircheninnenraumes gezeigt.

Blick von Podium zur Rückwand

Blick in den Dachstuhl

Abb. 6: Ansichten des Innenraumes der Marienkirche

3.2 Nutzungsplan der Marienkirche

Zurzeit finden im Jahr ca. 2 bis 3 Veranstaltungen statt. Man möchte die Kirche vermehrt als Veranstaltungsort nutzen und die Anzahl der Veranstaltungen auf 2 bis 3 Veranstaltungen pro Monat ausbauen.

Die Priorität und vorrangige Nutzung der Kirche sollen Musikveranstaltungen mit Chor und Kammerorchester sein. Hauptnutzer sind vor allem das preußische Kammerorchester und der uckermärkische Konzertchor Prenzlau. Aber auch andere Chöre nutzen die Kirche für ein Gastspiel. Eine Orgel ist nicht mehr vorhanden und eine Neuanschaffung ist auch nicht geplant.

Einmal im Jahr gibt es in der Kirche eine Predigt.

Daneben sollen in der Kirche eventuell auch Lesungen und Theaterveranstaltungen stattfinden. Man möchte zukünftig auch gerne die Kirche vermehrt für Messen und Ausstellungen nutzen.

Bei im Kirchenraum stattfindenden Konzerten stellen sich das Orchester und der Chor im 2. und 3. Joch des Mittelschiffes vom Ostgiebel aus gesehen auf. Die Anzahl der Chor- und/oder Orchestermitglieder variiert je nach Aufführung. Für den Chor können etwa 50 bis 150 Personen angenommen werden. Die Anzahl der Orchestermitglieder variiert zwischen 40 bis 80 Personen.

Zu Konzerten können im Schnitt 400 Besucher erwartet werden. Hierfür wird das Mittelschiff des 2. Joches bis zur Hälfte des 3. Joches vom Westwerk aus betrachtet bestuhlt. Bei stärkeren Besucherzahlen werden auch das 1. Joch im Westen und die Seitenschiffe genutzt. Es wurden schon Besucherzahlen von 800 Zuhörern erreicht.

Als Mittelwert für eine Standardbesetzung kann mit 400 Personen im Publikum und einer Besetzung der Aufführenden von ca. 100 Chormitgliedern und 40 Musikern gerechnet werden.

3.3 Erfahrungen mit der derzeitigen Akustik

In einer Rezension der Prenzlauer Zeitung über die Aufführung der Carmina Burana am 31.8. und 1.9.2002 in der Marienkirche wird die Akustik als „undifferenzierter Klangbrei“ und „in schnellen Abschnitten feinheitenfrei und klangunterverständlich“ beschrieben. Außerdem entstand der Eindruck „der klarstimmige, straff artikulierende und knapp phrasierende Chor

sei mit dem warmgetönten Orchester oftmals meilenweit auseinander“. Weiterhin wurde geschrieben: „wer sich seinen Sitzplatz statt im vorderen Drittel in hinteren Regionen suchte, hatte ein Glückslos gezogen.“ [Prenzlauer Zeitung vom 2.9.2002]

Auch der Dirigent und Leiter des Prenzlauer Ensembles beschreibt die Akustik als stark platzabhängig, besonders im hinteren Drittel der Zuhörerplätze.

Die Akustik im vorderen Drittel sei besser, aber dennoch fehlen der Zusammenklang und der direkte Gesamteindruck. Man habe das Gefühl, jedes Instrument einzeln zu hören, teilweise wie aus weiter Ferne klingend. In den vorderen Reihen sind kaum die tiefen Instrumente zu hören und die Violinen treten „dünn und fiepselig“ hervor, wohingegen auf den hinteren Plätzen die tiefen Klanganteile alles andere verdecken, und besonders die Pauken „wummernd und donnernd“ hervortreten. [nach mündlicher Auskunft des Intendanten des preußischen Kammerorchesters, Herr Bischoff, Prenzlau, 10.01.07]

In den Seitenschiffen ist erfahrungsgemäß die Klangqualität noch schlechter und stark verwaschen. Ebenso ist das gegenseitige Hören innerhalb des Chores oder zwischen Chor und Orchester teilweise sehr schwer bis gar nicht möglich. Die Sprachverständlichkeit in der Marienkirche wird ebenfalls als mangelhaft beschrieben. Besonders ab den mittleren Reihen ist trotz langsamen und deutlichen Sprechens nur sehr schwer etwas zu verstehen. [nach mündlicher Auskunft des Vorsitzenden des Vereins „Wir für Prenzlau“ e.V., Herr Beckert, Prenzlau, 10.01.07]

4 Akustische Messungen

4.1 Durchführung der Messungen

Die raumakustischen Messungen erfolgten im leeren Zustand des Kirchenraumes. Es standen lediglich 24 Polsterstühle im Raum.

Die Messungen wurden mit dem Messsystem Easera auf einem Laptop mit externer Soundkarte (Easera-Gateway) durchgeführt .

Als Messsignal wurde ein sweep verwendet und aufgrund der zu erwartenden langen Nachhallzeit wurde eine Messlänge von 5,9 sec ausgewählt. Eine Mittelung über 6 Messdurchgänge gewährleistete einen genügend hohen Signal-Rauschabstand.

Das Signal wurde über einen Dodekaeder-Lautsprecher gesendet und mit einem Kondensatormikrofon (½"Diffusfeldkapsel, Kugelcharakteristik) aufgenommen. Für einzelne Reflexionsmessungen wurden noch einmal Testweise ein paar Messpunkte über einen gerichteten Lautsprecher aufgenommen. Es wurden repräsentative Messpunkte sowohl auf der Auditoriumsfläche als auch außerhalb, im Seitenschiff und im hinteren Bereich ausgewählt.

Der Dodekaeder wurde auf dem Podium platziert und das Mikrofon hatte für die 10 Empfangspunkte eine Höhe von 1,2m (Ohrhöhe). In einem anschließenden Durchgang wurde der Dodekaeder an zwei anderen Plätzen im Raum positioniert und es wurden weitere Messungen mit einer Mikrofonhöhe von 1,8 m und 3m durchgeführt.

In einer letzten Messung wurde ein gerichteter Lautsprecher als Sender verwendet und einzelne Empfangspunkte gemessen. Der Vergleich mit der Kugelschallquelle zeigt die Abhängigkeit bestimmter Reflexionen von den Abstrahlrichtungen.

Der Messaufbau ist als Blockschaltbild in Abb. 7 abgebildet.

Alle Sende- und Empfangspositionen sind in Abb. 8 dargestellt und in Tab. 2 erläutert.

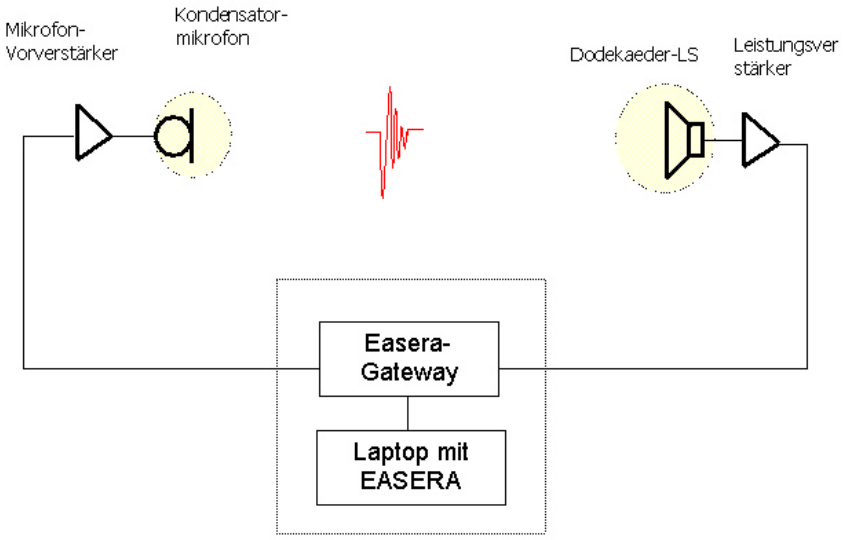


Abb. 7: Messaufbau

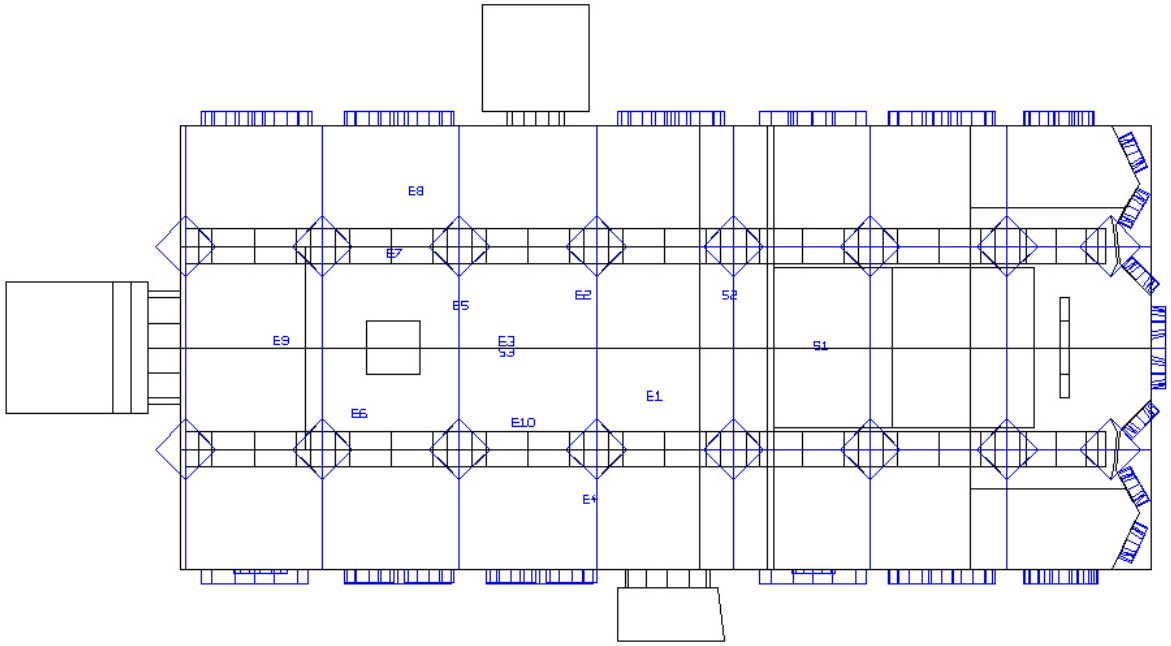


Abb. 8: Messpositionen

Tab. 2: durchgeführte Messungen

Sendeposition S	Empfangspositionen	Schallquelle	Mikrofonhöhe
S1	E1 bis E10	Dodekaeder	1,2 m
S2	E1 bis E10	Dodekaeder	1,8 m
S3	E1, E2, E4 bis E10, E"S1", E"S2"	Dodekaeder	3 m
S1	E1, E3, E7	PA-LS	1,2 m

Mess-Geräte:

- Kondensatormikrofon Bruel&Kjaer ½" Diffusfeldkapsel
- Mikrofonvorverstärker B&K Type 2610
- Easera-Gateway
- Laptop + Mess-Software Easera
- Pentadodekaeder + 2 x 150 W Leistungsverstärker "LAB Typ 300"
- PA-Lautsprecher: dB technologies Opera 418

4.2 Auswertung der akustischen Messungen

Im Hinblick auf die im Abschnitt 2.3 genannten raumakustischen Kriterien, soll untersucht werden, inwieweit die raumakustische Situation in der Marienkirche diesen Anforderungen entspricht.

Dies beinhaltet die Ermittlung der Nachhallzeit, die Auswertung der Reflektogramme mittels ETC und Ermittlung der Kriterien für die akustische Qualität für Sprache, wie Schwerpunktzeit, Deutlichkeitsmaß, Klarheitsmaß und STI. Weiterhin wurde untersucht, ob „schädliche" Reflexionen vorhanden sind. Hierfür wurden das Echokriterium und das ETC herangezogen.

Der in den Impulsantworten (und anderen Auswertungsansichten) erkennbare Anstieg ab ca. 5 s ist kein Echo oder keine sonstige akustische Raumantwort. Dieser „Fehler" ist

systembedingt und auf die Verschiebung von Verzerrungsanteilen bei der Messung mit Sweeps zurückzuführen. (siehe EASERA-Tutorial S. 59)

Zurzeit befindet sich im hinteren Bereich des Raumes ein Kunstwerk aus Glas in Form eines teils geschlossenen Glasquaders (ca. 3x3x3m). Dadurch konnten die Plätze in den hinteren Reihen nur eingeschränkt gemessen werden und es ist zu beachten, dass durch dieses Kunstwerk „Verfälschungen“ der Reflexionsgänge zu erwarten sind. Bei Betrachtung der Reflektogramme sind Einzelreflexionen vorhanden, vor allem bei hohen Frequenzen und bei Messpositionen in der Nähe des Glasquaders, die dann ohne den Glasquader wahrscheinlich nicht mehr vorhanden wären.

4.2.1 Auswertung der Nachhallzeit

Die Nachhallzeit wurde über eine Mittelung von 3 verschiedenen Sende- und jeweils 10 Empfangspositionen ermittelt [Abb. 8]. Es wurde die Nachhallzeit über einen Pegelabfall von 30 dB ermittelt, bei einem Signal-Rauschabstand (S/N) von ca. 20 bis 30 dB und bei einzelnen Messungen oder Frequenzbändern mit zu geringem S/N wurde die vom Messsystem ermittelte Nachhallzeit durch Anlegen der Regressionsgeraden „per Hand“ im Rausch-kompensierten Schröderplot korrigiert. Diese entsprechen dann eher der Nachhallzeit T20.

Die Nachhallzeit des leeren Kirchenraumes mit einem Volumen von ca. 45000 m³ beträgt für mittlere Frequenzen (500 Hz und 1 kHz) 5,2 s. Die ermittelte Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Frequenz ist in Tab. 3 gelistet und in Abb. 9 dargestellt. Der Verlauf der Nachhallzeit hat einen für Kirchen typischen Anstieg zu tiefen Frequenzen und einen Abfall zu hohen Frequenzen. Die Ursache mag darin liegen, dass vor allem tieffrequent absorbierendes Material, wie z.B. Holzeinbauten fehlen und auch ein für Kirchen typisch geringer Fensteranteil, in der Marienkirche 4,2 %, gegeben ist. Der Abfall zu hohen Frequenzen resultiert vor allem durch die bei großen Volumina greifende Absorption der Luft.

Da die Beurteilung der Nachhallzeit nicht nur für den unbesetzten Zustand, sondern vor allem für die besetzte Kirche relevant ist, wurde rechnerisch die Nachhallzeit für eine Standardbesetzung von 400 Personen und einer maximalen Besetzung von 800 Personen zusätzlich von ca. 100 Chor- und 40 Orchestermitglieder berechnet. Die Berechnung erfolgte mittels der in Tab. 6 angegebenen Absorptionsdaten für Personen, Chor und Orchester. Der angegebene Toleranzbereich (grau) zeigt die angestrebte Nachhallzeit für die durchschnittliche Besetzung. (näheres dazu in Abschnitt 6.1.1.1 Soll Nachhallzeit). Dieser Toleranzbereich bezieht sich auf ein Volumen von 30000 m³.

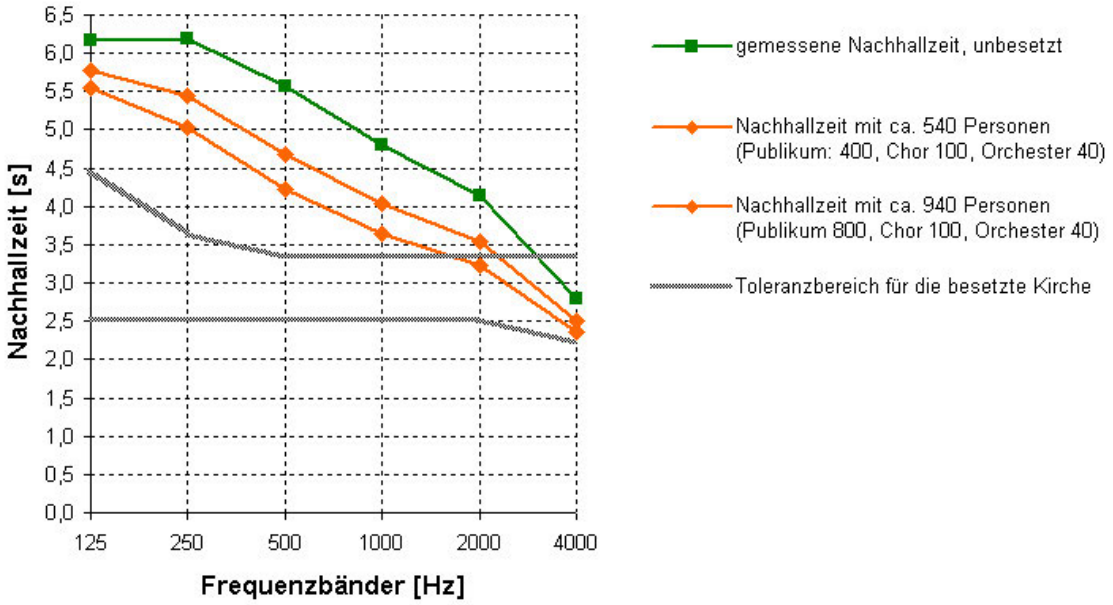


Abb. 9: gemessene Nachhallzeit in der Marienkirche, V ≈ 45000 m³

Tab. 3: gemessene Nachhallzeit und Berechnung für übliche und maximale Besetzung

Oktavband-Mittenfrequenz [Hz]	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
gemessene Nachhallzeit, unbesetzt	6,2	6,2	5,6	4,8	4,1	2,8
Nachhallzeit mit ca. 540 Personen (Publikum: 400, Chor 100, Orchester 40)	5,8	5,4	4,7	4,0	3,5	2,5
Nachhallzeit mit ca. 940 Personen (Publikum 800, Chor 100, Orchester 40)	5,6	5,0	4,2	3,6	3,2	2,4

4.2.2 Bewertung Nachhallzeit

Die gemessene Nachhallzeit in leerem Zustand entspricht den von Meyer angegebenen typischen Werten und dem Nachhallverlauf von gotischen Backsteinkirchen in leerem Zustand (siehe Abb. 3). Die gemessene Nachhallzeit liegt ebenso im Bereich der von Meyer empfohlene Nachhallzeit für den unbesetzten Kirchenraum. Die Nachhallzeit überschreitet aber die von Cremer angegebene maximale Nachhallzeit. Seine Empfehlung richtet sich nach den optimalen Nachhallzeiten von Konzertsälen.

In Abb. 10 sind die von den Autoren empfohlenen Nachhallzeiten für die besetzte und unbesetzte Kirche gegenübergestellt. Die rote Linie markiert die gemessene Nachhallzeit in der Marienkirche für mittlere Frequenzen. Im transparenten, breiteren Streifen liegen die ermittelten Nachhallzeiten für die mittlere und voll besetzte Kirche. Dieser Vergleich zeigt, dass die Nachhallzeit der Marienkirche für den besetzten Zustand über den empfohlenen Werten liegt.

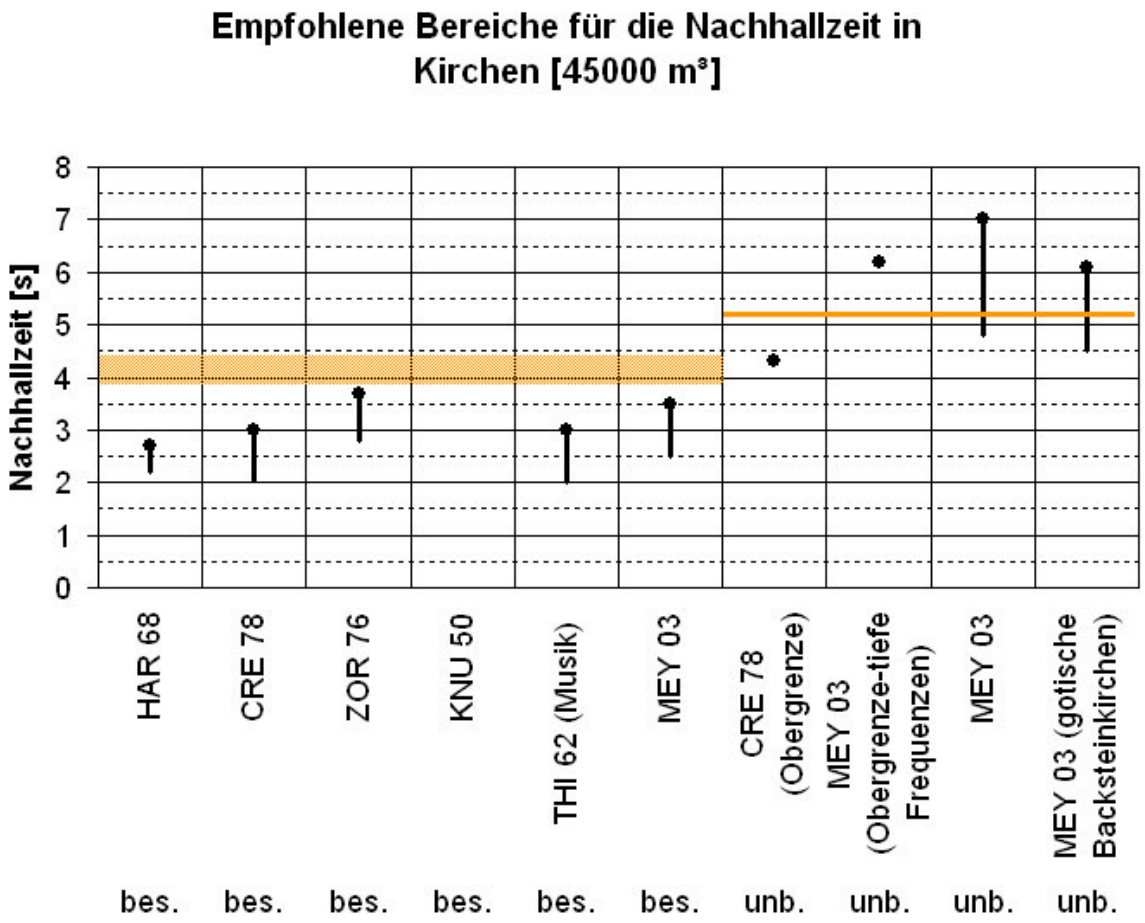


Abb. 10: Gegenüberstellung der empfohlenen Nachhallzeiten für besetzte und unbesetzte Kirchen bei einem Volumen von 45000 m³

bes. für den besetzten Zustand

unb. für den unbesetzten Zustand

gemessene Nachhallzeit in der leeren Marienkirche

sich einstellende Nachhallzeit für den mittleren bis voll besetzten Zustand

Die unterschiedliche Bewertung zwischen unbesetztem Zustand, in dem die Nachhallzeit dem von Meyer empfohlenen Werten entspricht und dem besetzten Zustand, der eindeutig eine zu lange Nachhallzeit für die Marienkirche zeigt, ist auf die „geringe“ Besetzung im Verhältnis zum Volumen zurückzuführen. In der Marienkirche ergibt sich bei einer maximalen Besetzung von schätzungsweise 1000 Personen (Publikum, Chor und Musiker) eine minimale Volumenkennzahl von 45 m³/Person. Die Volumenkennzahl von ca. 45m³/Person in der Marienkirche ist weit höher als die von Meyer verwendete Besetzungsdichte von 15m³/Person.

Diese minimal erreichbare Volumenkennzahl liegt ebenfalls weit höher als der empfohlene Wert von 8 bis 12 m³/Person für Konzertsäle für sinfonische Musik. Nun kann man für Kirchen gewiss höhere Volumenkennzahlen als für Konzertsäle als tolerabel gelten lassen. Denn die „akustische Atmosphäre einer Kirche“, die gewiss auch bei Konzerten erwartet wird, hängt mit einer etwas längeren Nachhallzeit als bei Konzertsälen zusammen. Ein zu großes Volumen bzw. eine zu hohe Volumenkennzahl bedeutet allerdings nicht zwangsläufig, dass die Nachhallzeit zu lang ist. Wenn ausreichend absorptive Flächen vorhanden sind, sinkt auch die Nachhallzeit.

In der Marienkirche sind kaum absorptive Flächen vorhanden, abgesehen von den hinzukommenden Personen. Die oft in anderen Kirchen zu findenden Holzeinbauten, wie Kirchenbänke, Empore etc. sind hier nicht vorhanden. Dies erklärt auch den Anstieg zu tiefen Frequenzen.

Einen weiterer wichtiger Grund für die zu lange Nachhallzeit ist das Fehlen des Kreuzgewölbes. Hierdurch kommt das 15000 m³ umfassende Volumen des Dachstuhls hinzu, dies entspricht der Hälfte des Kirchenschiffvolumens.

Nun ist die Nachhallzeit, wie bereits in dem Abschnitt 2 beschrieben, nicht die einzige Größe, die die Hörsamkeit eines Raumes beeinflusst. Entscheidend ist auch das „akustische Geschehen“, das kurz nach Eintreffen des Direktschalls folgt.

In den folgenden Abschnitten wird diese zeitliche Struktur näher untersucht.

4.2.3 Zeitliche Energie- und Reflexionsauswertungen

Für die Auswertung der zeitlichen Energieverteilung des Schalls und der energiereichen Reflexionen können verschiedene Darstellungen und Auswertungen verwendet werden. Die Energiekriterien wie Klarheitsmaß, Schwerpunktzeit, Deutlichkeitmaß etc. liefern Einzahlwerte zur Beurteilung der Hörsamkeit für einzelne Plätze.

Des Weiteren sollen die Betrachtungen der Energiereflektogramme (ETC) spezifischere Informationen über die zeitliche Verteilung der einzelnen Reflexionen liefern und durch Rückschlüsse mittels Simulation sowie errechenbarer Wegdifferenzen können deren Herkunft ermittelt werden. Hierfür könnte auch ein Vergleich zwischen den Messungen mit dem omnidirektionalen Dodekaeder und dem gerichteten PA-Lautsprecher, der ebenfalls auf Sendeposition 1 platziert war, herangezogen werden. Auf eine nähere Darlegung dieses Vergleiches, wird hier verzichtet.

Für die Beurteilung auf kritische Reflexionen in Hinsicht auf Echogefahr wurde neben der Betrachtung des ETC die Auswertung des Echokriteriums nach Dietsch herangezogen.

Für die Auswertungen werden die Messungen für die Sendeposition 1 (Dodekaeder auf Höhe 1,7m) und die Empfangspositionen auf der Auditoriumsfläche 1 bis 10 (auf Ohrhöhe 1,2m) verwendet.

4.2.3.1 Auswertung der (Energie-) Kriterien und Sprachverständlichkeit

Ein Überblick über die gemessenen Energiekriterien zeigt zunächst, welche Durchsichtigkeit und Sprachverständlichkeit bei dem derzeitigen Zustand der Marienkirche zu erwarten ist.

Tab. 4: Messauswertung objektiver Kriterien

Messposition	**STI**	**Alcons [%]**	**C50 [dB]**	**C80 [dB]**	**TS [ms]**
S01_E01 (Full IR)	0,49	12	-1	-0,1	254
S01_E02 (Full IR)	0,43	16	-3	-2,0	306
S01_E03 (Full IR)	0,41	18	-4	-2,3	327
S01_E04 (Full IR)	0,44	16	-2	-1,6	307
S01_E05 (Full IR)	0,34	27	-6	-5,0	379
S01_E06 (Full IR)	0,31	32	-7	-5,4	427
S01_E07 (Full IR)	0,32	30	-7	-6,3	427
S01_E08 (Full IR)	0,29	36	-8	-6,7	425
S01_E09 (Full IR)	0,25	43	-12	-10,3	471
S01_E10 (Full IR)	0,37	23	-5	-4,0	368
Optimalwerte nach [Fasold 1998, S.136]		<15	>0	-1 bis +3	100 bis 150

Für das Deutlichkeitsmaß ist kein Wert größer als 0 dB. Ein Blick auf die Werte für STI und Alcons, mit Vergleich zu den Bewertungsgrenzen in Tab. 1, zeigt noch deutlicher die stark eingeschränkte Sprachverständlichkeit in der Marienkirche. Auf Position 1, welche am nächsten zur Schallquelle ist, wird noch eine „ausreichende“ Verständlichkeit erreicht. Mit zunehmender Entfernung ist auf den hinteren Plätzen nur noch eine stark eingeschränkte bis weitestgehend unmögliche Sprachverständlichkeit gegeben. Diese Auswertung der STI und Alcons-Werte spiegelt deutlich die in Abschnitt 3.3 genannten Erfahrungen wieder. Eine gute Sprachverständlichkeit ist schwer zu erreichen und für hintere Plätze kaum möglich, auch bei deutlicher und langsamer Sprechweise.

Die ermittelten Werte für das Klarheitsmaß liegen zwischen 0 dB auf Position 1 und –7 dB auf den hinteren Plätzen mit den Position 6,7 und 8. Im Vergleich zu den angegebenen Optimalwerten liegen die vorderen Plätze noch am unteren Grenzbereich. Für die hinteren Plätze werden die Werte schlechter, was auch zu erwarten ist. Sie fallen jedoch stark unter den angegeben optimalen Rahmen.

Die auf der Position 9 gemessene Klarheitsmaß von –10 dB ist neben der sehr weiten Entfernung sicher auch auf den Zustand zurückzuführen, dass sie sich hinter dem Glaskunstwerk befindet und somit der Direktschall abgeschattet wird.

Die Schwerpunktzeit verlagert sich für die vorderen Plätze ab 250 ms zu den hinteren Plätzen auf 420 ms bis 470 ms. Diese Werte liegen weit über den angegebenen Optimalwerten. Sie zeigen deutlich, dass die Energie verzögert eintrifft und zeitlich breit verteilt ist. Der in den Erfahrungen geschilderte „Klangbrei, besonders auf den hinteren Plätzen“ kann hier noch einmal bestätigt werden.

Es sei hier darauf hingewiesen, dass diese Vergleiche mit Optimalwerten von Konzertsälen durchgeführt wurden, da es für Kirchen bisher kaum Erfahrungswerte gibt bzw. in der Literatur hierfür keine Beurteilungsrahmen angegeben werden. Es kann nur allgemein festgehalten werden, dass für Kirchen geringere Werte als raumtypisch akzeptiert werden. [Meyer 2003, S. 53]

4.2.3.2 ETC und Echokriterium

Betrachtet man die Impulsantworten oder die Reflektogramme (ETC), dann kann man zuerst ein charakteristisches Verhalten beobachten, dass in allen Reflektogrammen erkennbar wird. Nach dem Direktschall folgen starken Einzelreflexionen und dann entsteht ein „Energieloch“ bis ein erneutes Reflexionsbündel folgt bzw. die Schallenergie wieder ansteigt. Erst danach fällt die Energie kontinuierlich ab. Dies ist besonders in der Darstellung des Energie-Reflektogramms mit Bewertung der Zeitkonstanten des Gehörs (35 ms) zu erkennen

(„Weighted Energie“). Aber auch bei den Impulsantworten ist dieser „Energiebauch“ zu sehen. In Abb. 11 sind beide Darstellungen als überlagerte Darstellung verschiedener Empfangsplätze zu sehen.

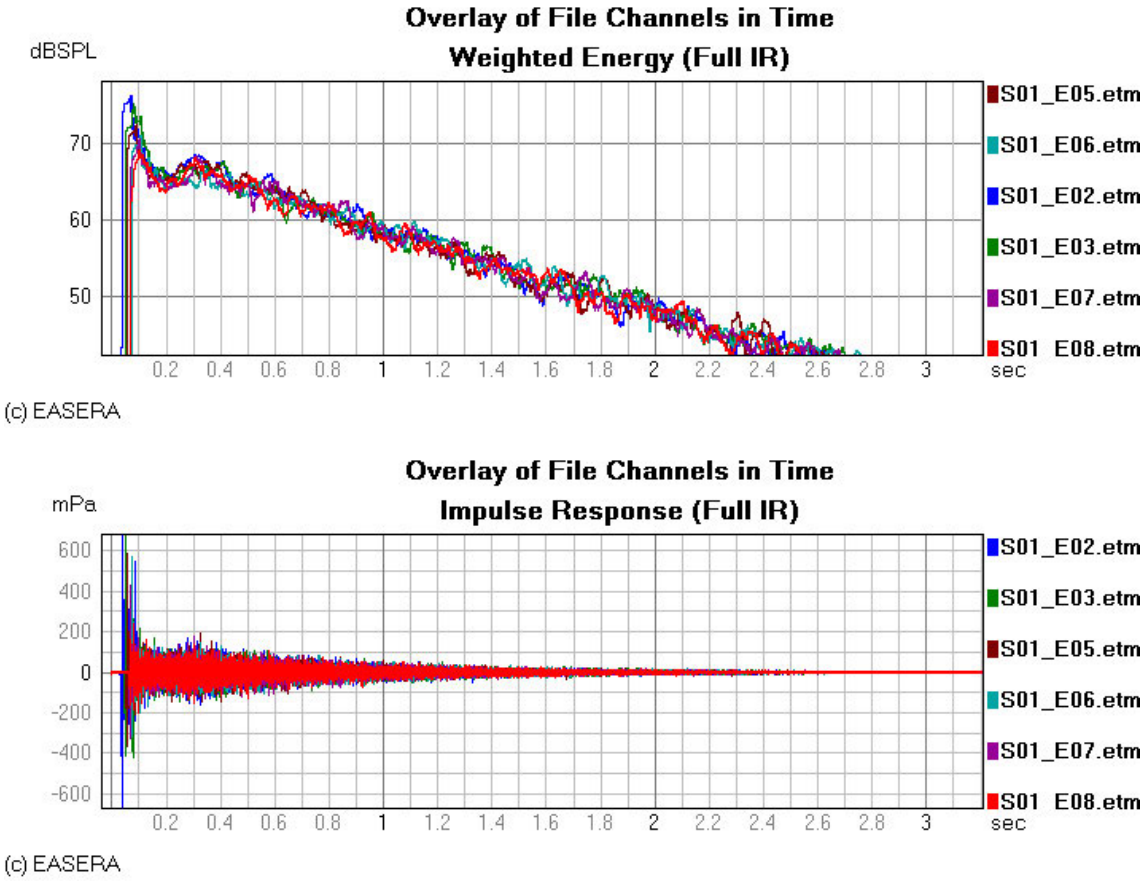


Abb. 11: überlagerte Darstellung von Weighted Energie und von Impulsantworten

Dieser Energieanstieg setzt bei den meisten Messpositionen ab ungefähr 200 ms absoluter Zeitmessung ein und erreicht bei ca. 300 ms sein Maximum, bevor die Energie danach wieder abfällt. Dies ist fast unabhängig von der Entfernung der Empfangsposition zu der Sendeposition. Dies spricht für ein Charakteristikum des gesamten Raumes für alle Plätze.

Rechnet man diesen Laufzeitunterschied in die vom Schall zurückgelegte Wegstrecke um, dann ergibt sich eine Wegstrecke von ca. 70 bis 100 m. Betrachtet man die Dimensionen der Kirche (Länge ca. 55 m, Höhe bis zur Dachspitze ca. 45 m) dann wird erkennbar woher dieser Energieanstieg kommt.

Aus den Simulationen konnte ermittelt werden, dass die ersten Reflexionen aus dem Dachstuhlbereich bei 190 ms beginnen. Aber auch die erste Rückwandreflexion liegt, je nach

Empfangsposition, zwischen 100 und 200 ms. Weitere Reflexionen, vor allem aus dem Dachstuhl folgen.

Man kann also feststellen, dass bis 200 ms nur wenig Schallenergie die Hörerplätze erreicht und dann der Hauptenergieanteil erst spät einsetzt. In den großen Werten der Schwerpunktzeit war dies bereits abzulesen. Das fehlende Kreuzgewölbe und der damit offene Dachstuhl haben einen großen Anteil daran.

Wie bereits erwähnt, folgen dem Direktschall starke Einzelreflexionen. Diese ersten Reflexionen treffen je nach Empfangsplatz (die Fußbodenreflexion ausgenommen) nach einer anfänglichen Lücke nach ca. 20 ms ein. Dem folgen weitere starke Anfangsreflexionen bis ca. 60 ms, für einzelne Plätze bis ca. 80 ms. Diese Anfangsreflexionen treten für die vorderen Plätze sehr stark hervor und stammen von den Säulen und den Seitenwänden. In den Abbildungen Abb. 12 bis Abb. 15 sind exemplarisch für die Messposition 1 die starken Einzelreflexionen gekennzeichnet und im Simulationsmodell ist ihr Reflexionsweg dargestellt. Besonders bei den Säulenreflexionen kann man in Abb. 13 die diffus streuende Wirkung aufgrund ihrer Strukturierung, im Reflektogramm sehen. Betrachtet man das Reflektogramm für die einzelnen Frequenzen in Abb. 16, kann man sehen, dass die Säulen auch bis 250 Hz reflektierend wirken, je nach Entfernung von Sender und Empfänger. Für das Oktavband von 125 Hz lässt diese Reflexionswirkung schon stark nach. Die ersten beiden Reflexionen von den Säulen sind schwächer als die folgenden Seitenwandreflexionen. Die Säulenbreite misst ca. 2,5 m. Die Wellenlänge von 125 Hz beträgt 2,7 m. Hier wird deutlich, dass die Säulenbreite für die betrachteten tiefen Frequenzen genau im Grenzbereich liegt, in dem der Schall reflektierend wirkt oder umso tiefer die Frequenz sinkt um die Säulen gebeugt wird.

Je weiter die Plätze entfernt sind, desto geringer sind diese Anfangsreflexionen ausgeprägt (siehe Reflektogramme im Anhang). Bei den Empfangspositionen 8 und 9 ist zudem der Direktschall sehr schwach, da er durch die Säulen (E08) oder den Glasquader (E09) abgeschattet wird.

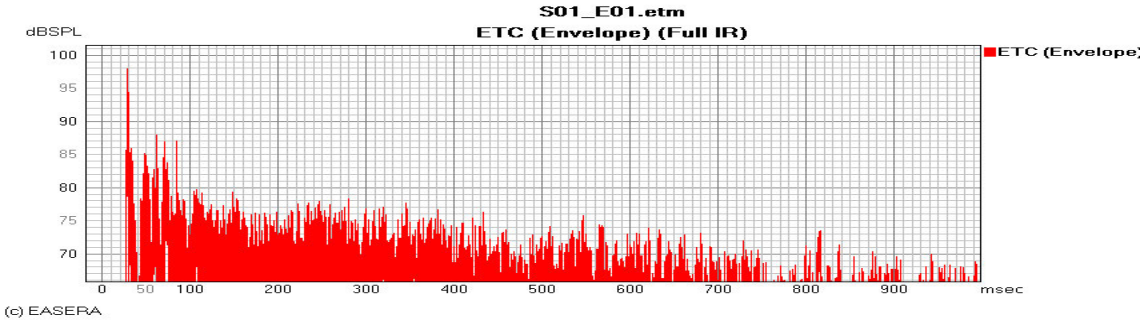


Abb. 12: ETC bis 1 Sekunde, über alle Frequenzen für Sendeposition 1 und Empfangsposition 1,

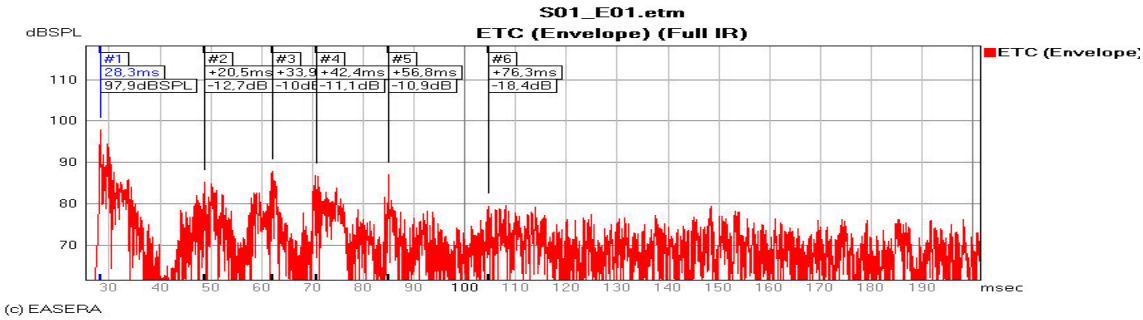


Abb. 13: ETC über alle Frequenzen für Sendeposition 1 und Empfangsposition 1

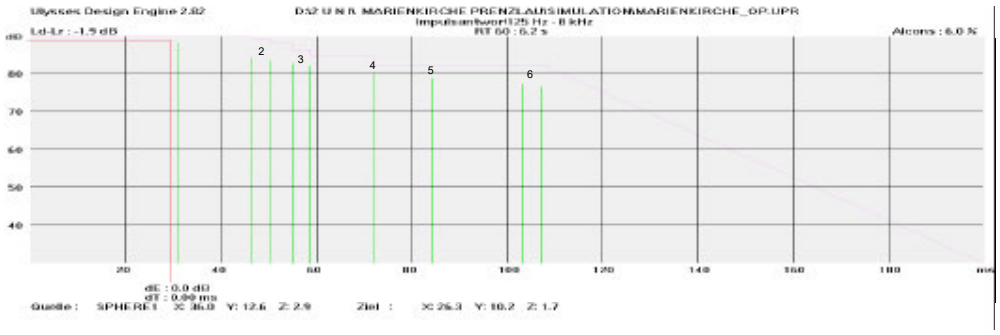


Abb. 14: ETC, simulierte Anfangsreflexionen erster Ordnung (S1E1)

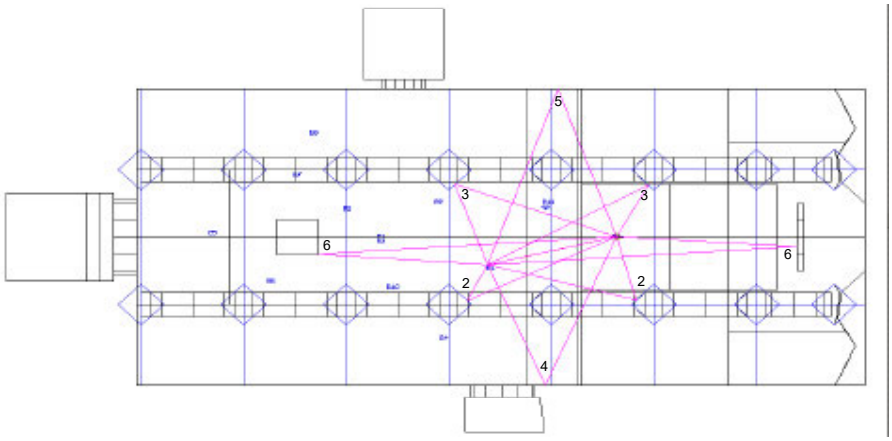


Abb. 15: Reflexionswege, simulierte Anfangsreflexionen erster Ordnung (S1E1)

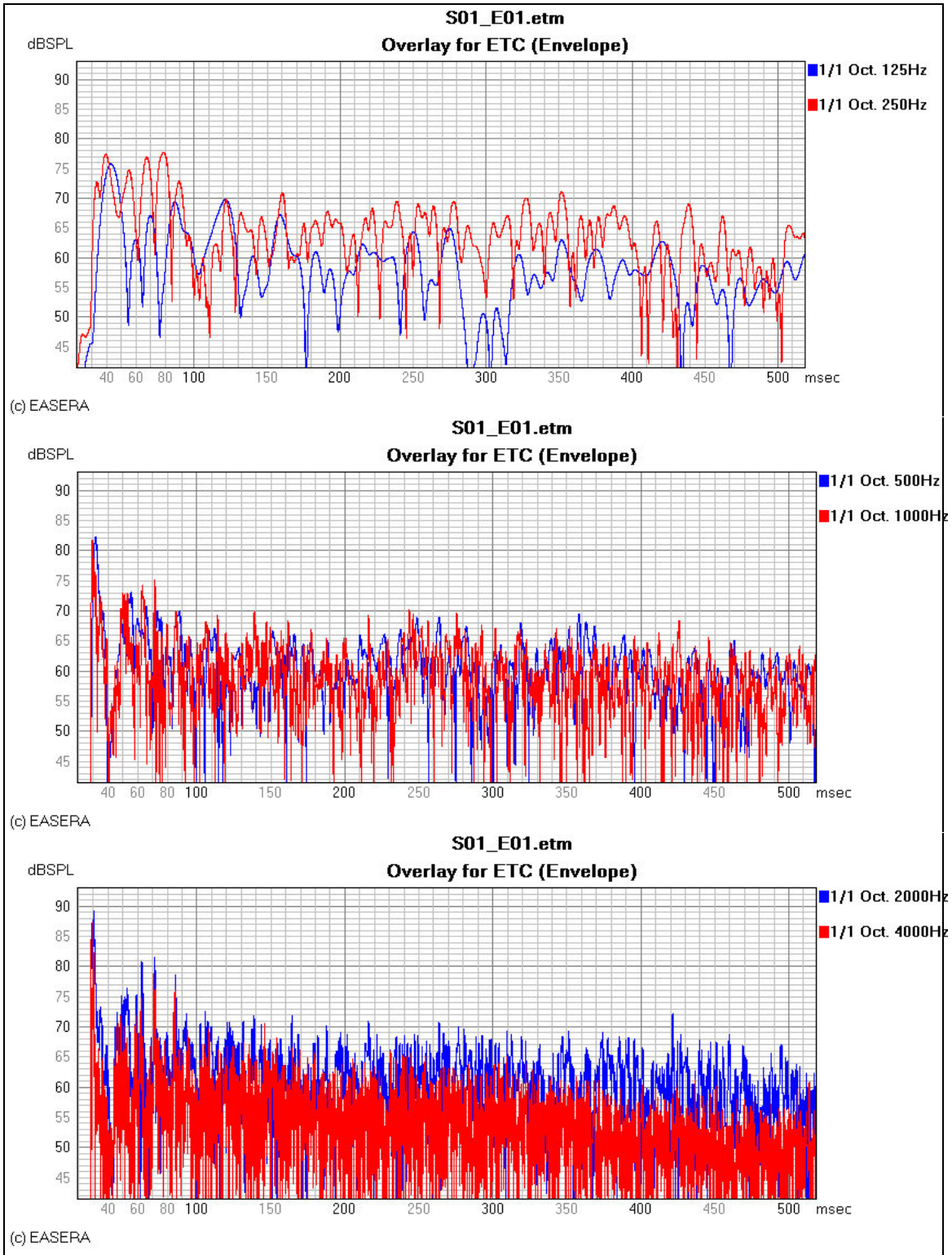


Abb. 16: Reflektogramm der Empfangsposition 1 für die einzelnen Oktavbänder

Eine überlagerte Darstellung der einzelnen Frequenzen zeigt, dass besonders bei den tiefen Frequenzen späte starke Reflexionen hervortreten (Abb. 17). Dies wird wird auch bei der Auswertung des Echokriteriums deutlich.

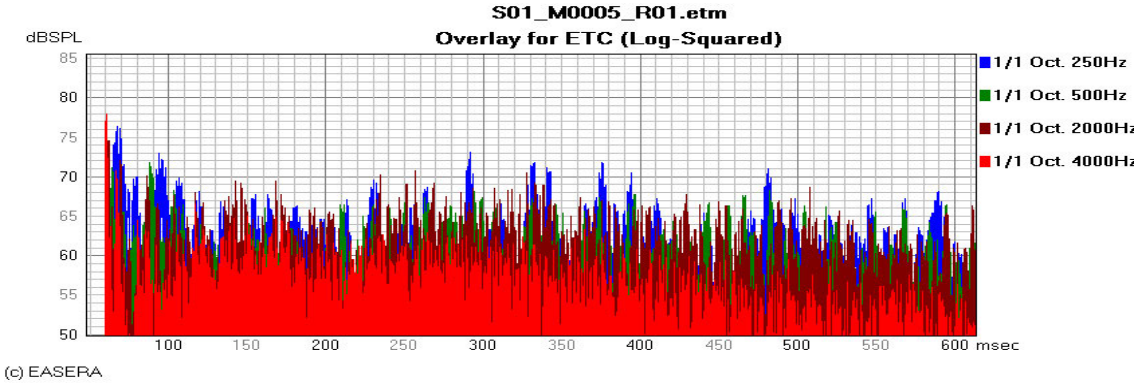


Abb. 17: ETC für die Empfangsposition 5 für einzelne Frequenzbänder

4.2.3.3 Echos, schädliche Reflexionen

Zu klären wäre jetzt noch die Frage, ob schädliche Reflexionen, oder sogar Echoerscheinungen, das Klangbild stören. Hierfür wurde die Auswertung des Echokriteriums nach Dietsch herangezogen.

Bei der Betrachtung des Echokriteriums über den kompletten Frequenzbereich lagen weder bei der Berechnung für Sprache noch bei der Berechnung für Musik die Reflexionen unterhalb der Grenze für eine wahrscheinliche Echowahrnehmung. Exemplarisch ist in Abb. 19 die Echoauswertung für die Empfangspositionen E01 und E05 dargestellt, jeweils einmal für das volle Frequenzspektrum und einmal für die einzelnen Oktavbänder. Wenn man die Auswertung für die einzelnen Oktavbänder durchführt, dann zeigt sich für einige Plätze bei der echokritischeren Sprachauswertung vor allem bei den tiefen Frequenzen eine Echogefahr. Dies war vor allem für die hinteren Plätze zu beobachten. Die Auswertungen für diese Plätze sind in Abb. 18 zu sehen. Die Reflexionsbewertungen bei tiefen Frequenzen reichen für einzelne Plätze an die Echogrenze für geübte Ohren heran (Plätze 2,5,7 und 9), für den Platz 6 und 9 ist bei 125 Hz eine Echogefahr angezeigt. Diese Reflexionen werden wahrscheinlich nicht als Echo hörbar werden. Ihre störende Wirkung, besonders auf die Sprachverständlichkeit, aber auch auf die Durchsichtigkeit bei Musik ist dennoch gegeben. Sie resultieren von Schallrückwürfen aus dem Eingangsbereich an der Westseite (Rückwand),

dem Schallrückwurf von der Ostwand bzw. dem Altar und für sehr tiefe Frequenzen (Oktavband 125 Hz) aus den Stirnseiten der Seitenschiffe.

Bei diesen Auswertungen zeigt es sich noch einmal, dass es in der Marienkirche besonders die tiefen Frequenzen sind, bei denen späte starke Reflexionen auftreten, die sich störend auswirken können. Dies liegt daran, dass für höhere Frequenzen die Rauminnenstrukturen diffus reflektierend wirken (Strukturierung der Säulen, Nischen an den Seitenwänden etc.) und mit zunehmender Laufzeit der Einfluss der Dissipation der Luft größer wird. Die tiefen Frequenzen können sich fast ungehindert ausbreiten und treffen bei den langen Schallwegen spät ein und können sich damit schlimmstenfalls als Flatterecho bemerkbar machen.

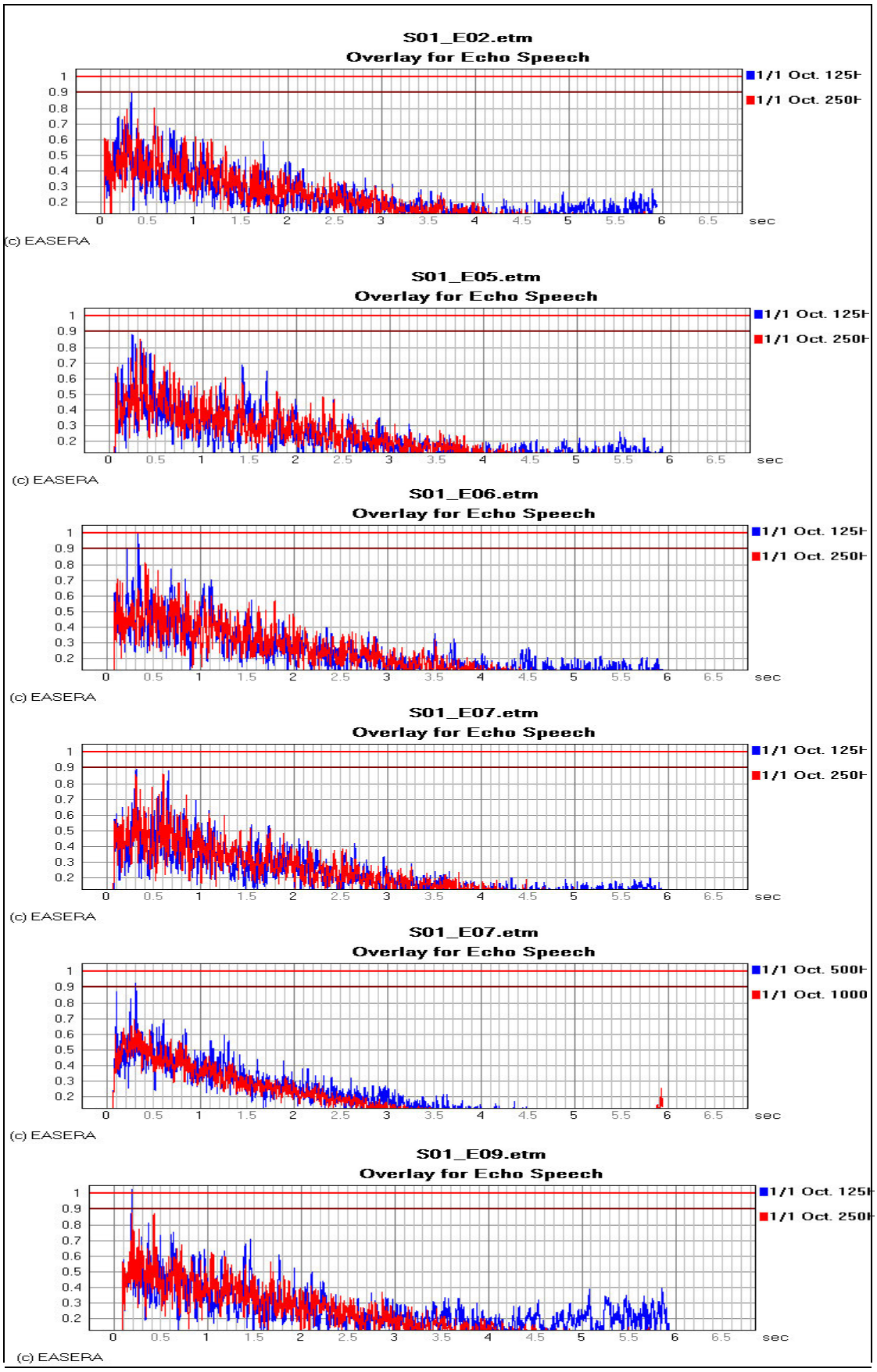


Abb. 18: Echokriterium für Sprache

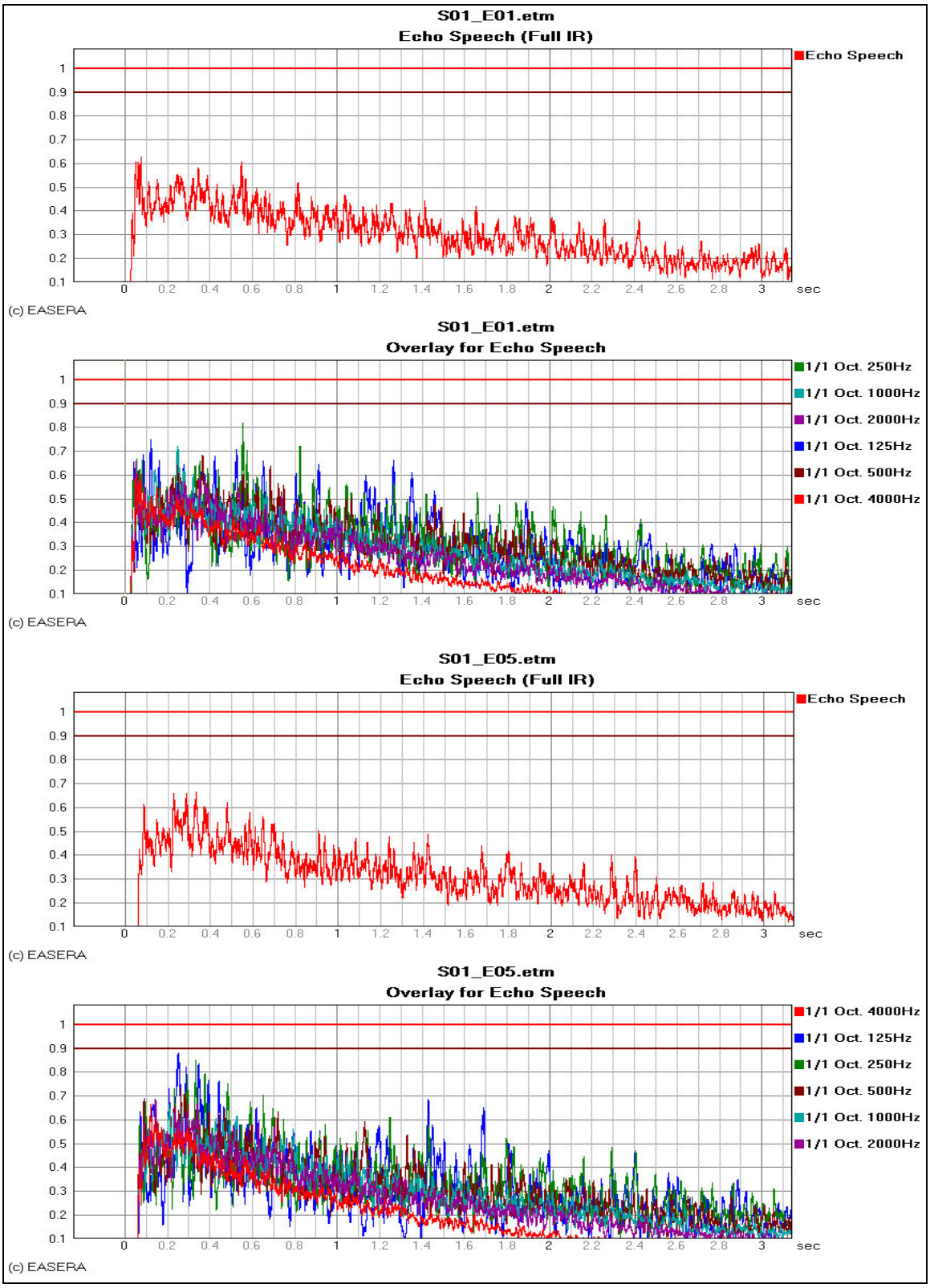


Abb. 19: Energiekriterium nach Dietsch für die Empfangspositionen E01 und E05, jeweils über das volle Frequenzspektrum und für die einzelnen Oktavbänder

5 Akustische Computersimulation

In der Computersimulation werden Verfahren der geometrischen und statistischen Raumakustik verwendet.

Eine genaue Beschreibung des Schallfeldes in einem Raum ist nur mit der wellentheoretischen Betrachtung unter Berücksichtigung aller Randbedingungen möglich. Allerdings haben reelle Räume häufig so komplexe Formen und Strukturen, dass schon die mathematische Beschreibung sehr kompliziert oder sogar unmöglich ist.

Die einfacheren Modellvorstellungen der geometrischen Akustik machen eine praktikablere Berechnung der Schallausbreitung möglich. Hierbei wird die Ausbreitung des Schalls anhand von Schallstrahlen beschrieben, welche sich geradlinig ausbreiten und an den Raumbegrenzungsflächen spiegelnd reflektiert werden.

Als Ergebnis erhält man die Beschreibung objektiver Schallfeldparameter, entsprechend den Grenzen des geometrischen Modells.

Die geometrische Akustik liefert theoretisch nur für unendlich ausgedehnte Flächen korrekte Ergebnisse. Das heißt, die Abmessungen der Flächen müssen groß gegenüber der Wellenlänge sein. Ist die Wellelänge in der Größenordnung der Fläche oder größer als die Abmessungen der Fläche, treten Beugungseffekte auf und nur noch ein Teil der Schallenergie wird reflektiert.

Da die Wellenlängen in der Größenordnung von einigen Zentimetern bis Metern liegen und somit auch den Abmessungen von vorhandenen Raum- und Flächenstrukturen entsprechen, können durch die geometrische Akustik nicht alle im Raum auftretenden Effekte beschrieben werden.

In der Computersimulation werden für die Ermittlung der Schallstrahlen im Allgemeinen zwei Verfahren verwendet, das Spiegelschallquellenverfahren und das Partikelverfahren.

Spiegelschallquellenverfahren

Bei dieser Methode wird für jede Flächenebene eine zur Schallquelle gespiegelte Quelle jenseits der Fläche erstellt und für den Empfangspunkt der Reflexionspunkt auf der Fläche ermittelt. Alle gefundenen Spiegelschallquellen werden einer Sichtbarkeitsüberprüfung unterzogen, welche überprüft ob der ermittelte Reflexionspunkt sich innerhalb der Begrenzungen der dargestellten Fläche befindet und der dazugehörige Schallweg nicht durch eine andere Fläche verdeckt ist. Die Bestimmung aller Spiegelschallquellen erfolgt bis zur N-ten Ordnung. Nach Berechnung der Übertragungsverluste, Absorption von Luft und

Wandflächen, werden alle gefundenen Schallwege mit ihren Laufzeiten und Pegelverlusten in der Impulsantwort dargestellt.

Die Spiegelschallquellenmethode ist die genaueste Methode für die Bestimmung aller möglichen geometrischen Reflexionspfade. Da die Anzahl der Spiegelschallquellen mit steigender Ordnung exponentiell zunimmt, wird mit ansteigender Ordnungszahl der Rechenaufwand immer aufwändiger.

Partikelverfahren

Beim Partikelverfahren werden ausgehend von der Schallquelle eine große Anzahl Schallstrahlen bzw. Schallteilchen (Träger von Schallenergie) in alle Richtungen ausgesendet. Die Richtungseigenschaften der Schallquelle können so zugeordnet werden, dass entweder gleichmäßig verteilte Schallstrahlen die Information der Schallenergie beinhalten oder die Schallstrahlen mit gleicher Schallenergie, in ihrer Häufigkeit entsprechend der Richtungscharakteristik auf die Richtungen, verteilt werden. Treffen diese Schallteilchen auf eine Fläche, werden sie spiegelnd oder ggf. diffus nach statistischer Regel reflektiert. Dabei verlieren sie gemäss dem Absorptionsgrad der Wand und der Laufzeit, entsprechend der Absorption der Luft, an Energie. Am Empfangsort zählt ein Detektor die Strahlpartikel, die den Empfangsort treffen oder nahe genug an ihm vorbeikommen um als Treffer gewertet zu werden. Durch Auswertung der Zeit- bzw. Wegdifferenz können sie mit ihrer verbliebenen Energie in der Impulsantwort angeordnet werden. Der Rechenaufwand steigt bei dieser Methode linear mit der Ordnungsanzahl, weist aber naturgemäß lückenhafte Ergebnisse auf, besonders mit zunehmender Laufzeit. Denn mit zurückgelegter Wegstrecke streben die Partikel immer weiter auseinander und die „Trefferquote“ sinkt mit steigender Zeit. Je nach Programm werden verschiedene Verfahren eingesetzt, um ein diffuses Nachhallfeld entstehen zu lassen, zum Beispiel durch diffuse Streuung mit statistischer Richtungsverteilung oder durch Vergrößerung des Detektorvolumens mit zunehmender Zeit.

Die Art der Raummodellierung und das verwendete Simulationsverfahren haben Einfluss auf die entstehende Impulsantwort.

5.1 Simulationsprinzipien der Software

Die Computersimulation zur Unterstützung der Konzeptionierung von raumakustischen Maßnahmen wurde mit der Software Ulysses durchgeführt.

In Ulysses wird der Raum mittels Cad-Werkzeugen gezeichnet und editiert. Durch Materialzuweisung, mittels vorhandener oder selbst erstellten Absorptionsdaten, wird den einzelnen Flächen eine frequenzabhängige Absorption zugeordnet. Schallquellen aus der Lautsprecherdatenbank können im Raum platziert werden.

Es können die Nachhallzeiten nach Sabine, Eyring und Fitzroy für die Oktavbänder von 125 Hz bis 8 kHz berechnet werden, und grafisch mit zugehöriger Absorption und äquivalenter Absorptionsfläche mit und ohne Luftabsorption dargestellt werden.

Die Pegel-Zeitberechnungen für alle Frequenzbänder können mit unterschiedlicher Berücksichtigung der Phasenlage (energetische oder betrags- und phasenrichtige Pegelsummation) und Berücksichtung von Abschattung und der ersten Reflexionen (bis 35ms) berechnet werden. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden auf der Hörfläche grafisch dargestellt oder können für markierte Plätze abgelesen werden. Durch Wechsel der Anzeige kann zwischen den einzelnen Frequenzen und der Darstellung des Direktschallpegels, Gesamtschallpegel, Differenz zwischen Direkt- und Gesamtschallpegel, Laufzeit, STI und Alcons gewählt werden.

Die Erstellung des Reflektogramms für die einzelnen Plätze kann bis zur vierzigsten Reflexionsordnung erfolgen. Die Software Ulysses verwendet für die Simulation der Reflexionen eine Kombination aus den Verfahren der Spiegelschallquellenmethode und des Partikelverfahrens. Bis zur dritten Ordnung werden die Reflexionspfade immer nach der Spiegelschallquellenmethode ermittelt, ab der vierten Ordnung ist die Verwendung der Methode abhängig vom jeweiligen Rechenaufwand. Der Übergang von Spiegelschallquellenverfahren zu Partikelverfahren erfolgt, wenn der Rechenaufwand der Spiegelquellenberechnung (Fläche ^ Ordnung) größer wird als die Berechnung für das Partikelverfahren [Fläche * Ordnung * Partikelanzahl].

Beim Partikelverfahren werden im 1-Grad-Raster 64000 Partikel gleichmäßig in alle Raumrichtungen gesendet. Wenn der verfolgte Schallstrahl nah genug am Empfangsort vorbeikommt (mittels „Volumen-Detektor“), wird diese Reflexion registriert.

Das Reflektogramm kann für die einzelnen Oktavbänder oder als Mittelung über alle Oktavbänder angezeigt werden. Im Reflektogramm kann man durch die einzelnen Reflexionen „durchsteppen“ und die jeweilige Zeitverzögerung und Pegeldifferenz ablesen. Durch wechseln in die Modellansicht wird der jeweilige Reflexionspfad angezeigt. Weiterhin wird die Anzahl und Nummer der an der Reflexion beteiligten Flächen angezeigt. Die über dem Reflektogramm angezeigte Nachhallzeit und der daraus ermittelte Alcons-Wert wird berechnet aus der mittleren Weglänge der Schallstrahlen. Um aussagekräftige Werte zu erhalten wird empfohlen, hier mindestens eine Reflexionsberechnung mit der Ordnung 5 durchzuführen.

5.2 Simulation und verwendete Daten

Das Modell wurde nach Plänen erstellt, die sich im Anhang als Kopie befinden (Maßstab 1:200).

Die verwendeten Absorptionsdaten für die Materialien in Tab. 5 und die Absorptionen der Personen in Tab. 6 wurden größtenteils der Literatur entnommen. Die in der Literatur oder Datenbanken unterschiedlichen Angaben zur Absorption von Ziegelstein variieren zwischen 0,03 bis 0,15. Da der Anteil von Ziegelstein in der Kirche bei ca. 60 % liegt, ergibt sich ein großer Unterschied abhängig davon, bei welchem Wert die Absorption liegt. Der Absorptionsgrad wurde so gewählt, dass er innerhalb des realistischen Rahmens liegt, und dass sich eine ungefähre Übereinstimmung der gemessenen Nachhallzeit mit der berechneten Nachhallzeit ergibt. Für das Dach musste ebenfalls eine Schätzung der Absorption verwendet werden.

Tab. 5: Verwendete Absorptionsgrade α der Materialien

Oktavband-Mittenfrequenz [Hz]	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
Dach	0,19	0,10	0,07	0,06	0,06	0,05
Steinfußboden, rau	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Ziegelstein	0,05	0,07	0,10	0,13	0,13	0,08
Ziegelstein (Säulen)	0,06	0,08	0,11	0,13	0,13	0,08
Fensterverglasung, innen Blei	0,15	0,30	0,16	0,10	0,05	0,03
Putz, porös	0,05	0,05	0,07	0,09	0,1	0,12
Holz	0,15	0,10	0,08	0,06	0,05	0,05
Glas	0,08	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01
Öffnung	0,40	0,40	0,60	0,70	0,80	0,80
Türblatt	0,20	0,10	0,06	0,05	0,05	0,05
Energiedämpfungskonstante der Luft m bei 60 % Luftfeuchte	$3 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$2{,}5 \cdot 10^{-4}$	$6{,}5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$

Tab. 6: Verwendete Absorption α und A der Personen

	Oktavband-Mittenfrequenz [Hz]	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
α	Publikum (0,7 m²/Person, 255 m²)	0,20	0,45	0,70	0,80	0,80	0,75
A	Chormitglied (< 0,5 m²/Person)	0,15	0,25	0,40	0,50	0,60	0,60
A	Orchestermitglied (> 2 m²/Person)	0,45	0,65	0,85	1,00	1,10	1,10
		Umrechnung von A für besetzte Fläche in Simulation					
α	Chor auf (~70 m²)	0,25	0,42	0,67	0,83	1,00	1,00
α	Orchestermitglied (~60 m²)	0,23	0,33	0,43	0,50	0,55	0,55

Bei der Modellierung des Raumes ist es wichtig, die Hauptflächen grob zu erfassen. Dies ist sinnvoll aufgrund des zu betrachtenden Wellenlängenbereiches, für den diese Flächen geometrisch reflektierend wirken. Zudem ist es unter der Berücksichtigung der Modellgrenzen der verwendeten Verfahren (Spiegelschallquellen) sinnvoll. Wie bereits in Abschnitt „Akustische Computersimulation“ beschrieben wird beim Spiegelquellenverfahren nur ein Schallweg gefunden, wenn der Reflexionspunkt der entsprechenden Flächenebene sich innerhalb der gezeichneten Fläche befindet. Ist die Gesamtfläche zu stark strukturiert gezeichnet, dass meint in viele kleine Flächen unterteilt die sich in unterschiedlichen Ebenen befinden, ist die Wahrscheinlichkeit geringer, dass die Fläche genau dort in der Ebene liegt, wo sich für das Spiegelflächenverfahren dieser Reflexionspunkt befindet, und somit sinkt die Trefferquote.

Die Ergebnisse der Computersimulation werden im Zusammenhang mit den Messauswertungen und der erstellten Maßnahmen dargestellt.

6 Maßnahmen zur Verbesserung der Raumakustik

Das in dieser Magisterarbeit entwickelte Konzept zeigt die grundsätzlich möglichen Maßnahmen und stellt eine Ausführungsvariante hierfür vor. Diese Maßnahmen stellen Abschätzungen und Vorschläge dar, die bei einer zukünftig realisierten Planung und Ausführung, der Abstimmung mit architektonischen Gestaltungswünschen und bautechnischen Möglichkeiten bedürfen.

6.1 Ziele der Maßnahmen

Die Ziele der Maßnahmen, wie sie bereits in Abschnitt 2.3 genannt wurden, sollen hier noch einmal genannt werden. Die Nachhallzeit soll reduziert werden und ein linearer Frequenzverlauf der Nachhallzeit wird angestrebt. Die ungehinderte Direktschallabstrahlung soll verbessert werden. Durch gezielte Reflexionslenkung sollen nützliche Reflexionen geschaffen werden, um den Direktschall zu unterstützen und um die Deutlichkeit, Durchsichtigkeit und Räumlichkeit von Musik und Sprache zu verbessern. Der Bühnenkontakt zwischen den Darstellenden muss durch bühnenbegrenzende Flächen gewährleistet werden. Des Weiteren sollen störende Reflexionen in kritischen Raumbereichen vermieden werden.

Zur Erreichung und Verbesserung dieser Ziele können Maßnahmen zur Veränderung der Raumgestaltung und auch teilweise durch Veränderung der Raumform durchgeführt werden.

Es werden bereits vorhandene Einrichtungen genannt, einfach um die Funktionalität dieser Maßnahmen zu verdeutlichen und sie in das Gesamtkonzept zu integrieren.

Die zu erfüllenden Kriterien (Soll-Werte) für mögliche Maßnahmen werden im Weiteren genannt und an einem Ausführungsbeispiel in Abschnitt 6.2 dargelegt.

6.1.1 Nachhallzeit

Anmerkungen zur Festlegung der Nachhallzeit

Wie bereits in Abschnitt 2.1.1 dargelegt, findet man in der Literatur verschiedene Ansätze und Empfehlungen für die optimale Nachhallzeit in Kirchen.

Eine Grafik für die von den verschiedenen Autoren empfohlene Nachhallzeiten in Kirchen ist in Abb. 20 für ein Volumen von 30000 m³ eingetragen.

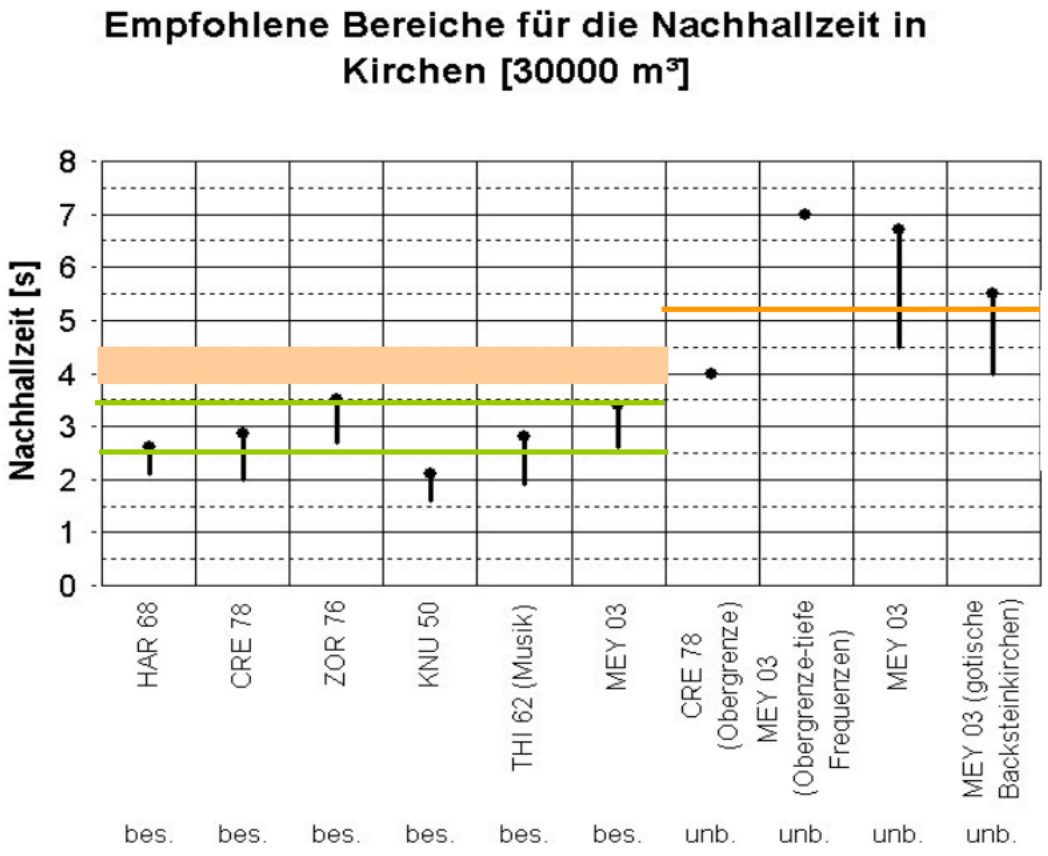


Abb. 20 Gegenüberstellung der empfohlenen Nachhallzeiten für besetzte und unbesetzte Kirchen bei einem Volumen von 30000 m³

bes. für den besetzten Zustand

unb. für den unbesetzten Zustand

gemessene Nachhallzeit in der leeren Marienkirche

sich einstellende Nachhallzeit für den mittleren bis voll besetzten Zustand

SOLL- Nachhallzeit für den besetzten Zustand

Eine Einordnung der anvisierten Nachhallzeit für die Marienkirche erfolgt unter Berücksichtigung der gewünschten Nutzungsart und dem durchschnittlich zu erwartenden Besetzungszustand.

Da in der Marienkirche vor allem für die Konzerte eine angemessene Akustik, und somit angemessene Nachhallzeit vorhanden sein soll, wird der Schwerpunkt der akustischen Dimensionierung hierauf gelegt. Hinsichtlich der Sprachdarbietungen muss hier ein Kompromiss eingegangen werden.

Ein wichtiger Aspekt, auch unter der Betrachtung der empfohlenen Nachhallzeiten, ist der Umstand, dass in der Kirche keine Orgel vorhanden ist oder eingebaut werden soll. Denn Orgeln verlangen allgemein eine höhere Nachhallzeit als sinfonische Musik und bei den angegebenen Nachhallzeiten von Kirchen ist dies in der Empfehlung teilweise mit berücksichtigt.[2]

Des Weiteren wird die angestrebte Nachhallzeit auf den üblich besetzten Zustand von 400 Personen dimensioniert, denn dann ist die Akustik für die Darbietung relevant. Die Möglichkeit, dass unter Umständen größere Besucherzahlen bis ca. 800 Personen vorhanden sind, wird miteinbezogen. Hier muss berücksichtigt werden, dass bei maximaler Besetzung ein Wert von 2,5 s nicht unterschritten werden sollte. Dieser Wert sollte deutlich über dem Wert für Konzertsäle liegen. [vgl. Meyer 2003, S.151] „Besucher von Kirchenkonzerten schätzen nämlich die besondere optische, aber auch akustische Atmosphäre, die sie umgibt, und die sie von anderen Veranstaltungsorten unterscheidet. Die akustische Atmosphäre bildet einen nicht zu unterschätzenden Anteil an dem ästhetischen Gesamteindruck eines Kirchenkonzertes.“ [Meyer 2003, S.151]

Beim Frequenzverlauf der Nachhallzeit wird ein gerader Verlauf angestrebt. Eine Absenkung zu den hohen Frequenzen wird wohl aufgrund des großen Volumens und somit des stärkeren Einflusses der Dissipationsverluste nicht zu vermeiden sein, ist aber auch nicht negativ zu werten. Ein Anstieg zu den tiefen Frequenzen liegt ebenfalls im Toleranzbereich. Auch wenn ein linearer Verlauf angestrebt wird, ist gerade die Senkung der tieffrequenten Nachhallzeit aus bautechnischen Gründen und architektonischen Möglichkeiten eher schwieriger realisierbar.

Da das Publikum vorrangig mittel- und hochfrequent absorbierend wirkt und die Posterstühle bei Nichtbedarf weggeräumt werden, wird im leeren oder wenig besuchtem Kirchenraum der

---

[2] Eine Orgel wird zumeist auch an die jeweils vorhandene Raumakustik angepasst. Oder, wenn ein Orgel schon vorhanden ist, wie dies in historischen Kirchen oft der Fall ist, dann ist bei architektonischen Veränderungen, und somit auch Veränderung der Akustik, zu bedenken, dass die Orgel an die ursprünglich vorhandene Akustik, bzw. Nachhallzeit, dimensioniert war und somit Veränderungen des Orgelklanges resultieren können.

Nachhallfrequenzgang im mittleren und hohen Frequenzbereich ansteigen, wohingegen, der tieffrequente Nachhall konstant bleibt.

Der Toleranzbereich für die Variation der Nachhallzeit, vor allem bei unterschiedlichen Besetzungsgraden oder durch Ausführungsvarianzen, wurde Hartmann entnommen. [vgl. Hartmann 1969, S. 103]

Des Weiteren ist zu beachten dass bei Vorhandensein von schalllenkenden Maßnahmen für frühzeitige Reflexionen, eine höhere Nachhallzeit möglich ist. Beziehungsweise beeinflussen die gezielten frühen Reflexionen die subjektiv empfundene Nachhalldauer und durch Flächenbegrenzungen der Bühne wird weniger Schallenergie in nachhallproduzierende Bereiche und somit dem gesamten Nachhallfeld zugeführt. Ebenfalls ist eine höhere Nachhallzeit möglich, wenn zu tiefen Frequenzen die Nachhallzeit absinkt.

6.1.1.1 Soll Nachhallzeit

Es soll eine Nachhallzeit von T ≈ 2,8 s bei mittleren Frequenzen für den besetzten Zustand eingestellt werden.

Für die Dimensionierung wird eine übliche mittlere Besetzung mit ca. 400 Personen im Publikum, ca. 100 Chormitgliedern und ca. 40 Orchestermusikern zu Grunde gelegt.

Eine Grafik der anzustrebenden Nachhallzeit mit Toleranzbereich ist in Abb. 9 im Abschnitt 4.2.1Auswertung der Nachhallzeit zu sehen.

Bei Variation der Besetzungszahlen soll die Nachhallzeit im angegebenen Toleranzbereich von minimal 2,5 s bis maximal 3,4 s liegen.

Es wird soweit technisch möglich ein linearer Verlauf der Nachhallzeit angestrebt**.**

Um eine Senkung der Nachhallzeit zu erreichen, kann man, wie die Sabin'sche Formel zeigt, zusätzliche Schallabsorption einbringen und/oder das Volumen verringern.

Da in der Marienkirche das ursprünglich vorhandene Kreuzgewölbe fehlt und somit das Volumen durch das zusätzliche Dachvolumen vergrößert ist, bietet sich die Maßnahme der Volumenreduzierung durch Abkopplung des Dachvolumens hier an. Durch diese Maßnahme wird ein großer Teilt der Nachhallregulierung erreicht. Die dann noch zusätzliche erforderliche Schallabsorption ist wesentlich geringer. Die eingezogene Decke bietet zusätzlich Fläche, in der Absorption untergebracht werden kann. Es sollte aber zuerst darauf bedacht sein, die erforderliche Absorption an Raumstellen unterzubringen, an denen störende Reflexionen zu erwarten sind, z.B. Rückwandbereich. Die Decke bietet aber die beste

Möglichkeit, um die erforderliche tieffrequente Absorption unterzubringen, die sonst schwer im Kirchenschiff unterzubringen ist, näheres dazu im nächsten Kapitel 6.1.1.2.

Sollte keine Abtrennung des Dachvolumens erfolgen, ist eine wesentlich höhere zusätzlich einzubringende Schallabsorption erforderlich, um die Nachhallzeit zu senken. Da die Unterbringung der Absorption im Raum begrenzt ist, bliebe hier vor allem die Unterbringung im Dachstuhl. Die Erreichung der optimalen Nachhallzeit ist aber hier schwieriger, vor allem die Senkung der tieffrequenten Nachhallzeit.

Zu Bedenken ist hierbei auch, dass durch zusätzliche Absorption bei gleichbleibendem Volumen die Schallenergiedichte und damit auch die erzielbare Lautstärke im diffusen Schallfeld abnehmen. Daher ist eine Abtrennung des Dachvolumens vorteilhafter.

In den nachfolgenden Tabellen Tab. 7 und Tab. 8 sind die erforderlichen zusätzlichen äquivalenten Absorptionsflächen für beide Fälle aufgelistet.

Um für den Fall der abgehängten Decke die „absolut" erforderliche Schallabsorption zu erhalten, wurde im Simulationsmodell die abgehängte Decke als total schallreflektierend (α = 0) gesetzt und aus den Werten wurde dann die zusätzliche Schallabsorption berechnet, die dann auch in der Decke untergebracht werden.

Tab. 7: erforderliche zusätzliche äquivalente Schallabsorptionsfläche Sα für den Fall einer eingezogenen Decke (V = 30000 m²), eingezogene Decke mit α=0 eingesetzt

Oktavband-Mittenfrequenz [Hz]	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
RT – ist [s] (Simulation mit abgehängter Decke (α=0)+ Personen)	**7,5**	**5,0**	**4,0**	**3,3**	**2,9**	**2,3**
Sα - ist [m²] (Simulation mit abgehängter Decke (α=0)+ Personen)	**632**	**944**	**1203**	**1459**	**1637**	**2065**
RT –soll [s]	**2,8**	**2,8**	**2,8**	**2,8**	**2,8**	**2,8**
Sα -soll [m²]	**1746**	**1746**	**1746**	**1746**	**1746**	**1746**
zusätzliches Sα [m²]	**1114**	**802**	**653**	**287**	**109**	**-319**

Tab. 8: erforderliche zusätzliche äquivalente Schallabsorptionsfläche A für den Fall wenn keine Decke eingezogene ist (V = 45000 m²)

Oktavband-Mittenfrequenz [Hz]	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
RT - ist (gemessen + Pers.) [s]	**5,8**	**5,4**	**4,7**	**4,0**	**3,5**	**2,5**
Sα - ist (gemessen + Pers.) [m²]	**1270**	**1348**	**1566**	**1817**	**2074**	**2924**
RT –soll [s]	**2,8**	**2,8**	**2,8**	**2,8**	**2,8**	**2,8**
Sα -soll [m²]	**2620**	**2620**	**2620**	**2620**	**2620**	**2620**
zusätzliches Sα [m²]	**1350**	**1272**	**1054**	**802**	**546**	**-304**

6.1.1.2 Unterbringung der Absorption

Die zusätzlich erforderliche Absorption kann auf unterschiedliche Weise im Raum untergebracht werden. Dabei ist entscheidend, wie weit in die vorhandene Bausubstanz eingegriffen und verändert werden kann. Mobile Maßnahmen, wie Vorhänge, Wandteppiche etc., schränken die Bandbreite der Nachhallregulierung zwar ein, können aber trotzdem auch sehr zielbringend eingesetzt werden. Als Vorteil von mobilen Maßnahmen wäre zu nennen, dass hierdurch eine stiltypische Nachhallzeit für gotische Kirchen erhalten bleibt. Diese kann dann durch mobile Elemente entsprechend den Erfordernissen gesenkt werden. Ein weiterer großer Vorteil wäre hier auch die Variabilität, die für unterschiedliche Besetzungsgrade oder Nutzungsarten einsetzbar ist.

Vorrangig sollten Flächen mit Absorption belegt werden, bei denen mit störenden Reflexionen zu rechnen ist. Dies ist vorrangig der Rückwandbereich. Die Gefahr störender Reflexionen von der Ostwand, wie es in den Messauswertungen genannt wurde, wird durch bühnenbegrenzende Maßnahmen reduziert. Für weitere zu belegende Flächen wären diese Wandbereiche die nächste Wahl.

Als mobile Maßnahmen für die Belegung der Wandbereiche bieten sich Vorhänge, Wandteppiche, absorptive Folien etc. an. Durch einen ausreichenden Wandabstand können diese auch für tiefere Frequenzen wirksam werden.

Die Vorhänge und Folien können auch freihängend im Raum angebracht werden, z.B. zwischen den Säulen. Durch doppelte Aufhängung mit einem Zwischenraum reicht auch hier die Absorption weiter in den tieffrequenten Bereich hinein, allerdings weniger stark wie bei Positionierung vor einer harten Wand.

Des Weiteren bieten sich die rückseitigen Flächen der später noch genannten Deckensegel und Stellwände. Diese sollten wenn möglich auch so ausgeführt werden, dass auch für tiefe Frequenzen eine absorptive Wirkung erzielt werden kann. Dies ist hauptsächlich durch doppelwandige Ausführung mit einem Luftraum dazwischen möglich. Der Luftraum sollte mindestens 5cm, aber besser 10 cm betragen.

Bei der absorptiven Belegung der Rückseite von Stellwände und Deckensegel ist zu beachten, dass die absorbierende Wirkung nicht voll anzurechnen ist, wenn sich die absorbierenden Flächen zu nah an den Raumbegrenzungen befinden.

Als weitere Fläche zur Unterbringung der Absorption bietet sich die Deckenfläche an. Wie bereits erwähnt ist die Decke für die Unterbringung der tieffrequenten Absorption hier die erste Wahl. Dies kann durch die Auswahl eines Materials mit entsprechend dem für tieffrequente Schallabsorption nötigem Hohlraum hinter der Decke, ca. 30 bis 400 mm, erreicht werden. Der hintere Abschluss des Hohlraums muss durch ein „ausreichend schweres“ Material gegeben sein.

Für die Belegung der mittel- und hochfrequenten Absorption wird eher empfohlen sie z.B. auf den Rückseiten der Stellwänden und Deckensegel unterzubringen und/oder durch Vorhänge, Absorptionsfolien, Wandteppiche o.ä. zu realisieren. Wenn die Vorhänge, Folien o.ä. variabel aufgehangen werden, dann wäre durch auf- und zuziehen (oder rauflassen und runterlassen) eine variable Akustik möglich, die es erlaubt, bei schwächeren Besetzungen trotzdem eine akzeptable Nachhallzeit zu erzielen, da z.B. Vorhänge wie Publikum mittel- und hochfrequent absorbierend wirken.

Je nach Gestaltung von Stellwänden, ist hier ebenfalls eine Variabilität der Akustik möglich.

In dem Zusammenhang sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Belegung und Verteilung von der erforderlichen zusätzlichen Schallabsorption auch abhängig ist von der Entscheidung, ob eine abgehängte Decke realisiert werden kann.

Wenn keine abgehängte Decke realisiert werden kann, sind mehr absorbierende Flächen und Materialien unterzubringen, die neben den eben genannten Möglichkeiten dann vorrangig auch im Deckenbereich platziert werden sollten. Möglich wäre hier die Verwendung von Baffles, Vorhängen etc. Die Erreichung der optimalen Nachhallzeit ist aber hier schwieriger, vor allem die Senkung der tieffrequenten Nachhallzeit.

Die Verwendung von Polsterstühlen gewährleistet eine Unabhängigkeit der Nachhallzeit vom Besetzungsgrad.

Die letztendliche Verteilung der Absorption im Raum und Abstimmung einzelner Maßnahmen aufeinander kann erst erfolgen, wenn eine detaillierte Planung mit Auswahl der architektonischen Vorstellungen erfolgt, z.B. wie viele Stellwände, Deckensegel Vorhänge etc. sollen vorhanden sein und welche Materialien für die einzelnen Elemente stehen zur

Auswahl. Dies sind Entscheidungen, die im Laufe von Projektierungen und Rücksprache mit dem beratenden Akustiker erfolgen können.

6.1.2 Direktschallabstrahlung

Eine freie Abstrahlung des Direktschalls ist vor allem vor allem dann gegeben, wenn auch der Sichtkontakt vorhanden ist. Bei ebener Anordnung von Bühne und Publikumsfläche ist dies nur für die vorderen Reihen gegeben.

Der Direktschall wird vom Publikum umso stärker abgeschwächt, je flacher er über die Publikumsfläche hinweggeht. Dies gilt vor allem für die mittleren und hohen Frequenzen, Dies wirkt sich dann besonders negativ für die hinteren Plätze aus, nicht nur für die Lautstärke und Klarheit, sondern auch für die Balance der Orchestergruppen.

Um eine bessere Direktschallabstrahlung zu gewährleisten können Chortreppen und Podeste verwendet werden.

Der Direktschall kann durch frühzeitige Reflexionen unterstützt werden.

6.1.3 Nützliche Reflexionen

Die Decke und die Seitenwände haben einen zu großen Abstand, als dass sie für nützliche Reflexionen, sowohl für das Auditorium als auch für den Bühnenkontakt nutzbar sind. Deshalb müssen zur Förderung früher Reflexionen zusätzliche schallreflektierende Flächen mit geringerem Abstand geschaffen werden. Primär sind hier vor allem Flächen im Bereich der Bühne zu schaffen. Weitere Flächen im Bereich des Auditoriums bringen weitere Verbesserungen.

Zur Unterstützung des Direktschalls ist ein Schallumweg von maximal 8 bis 10 m (~30 ms) erforderlich. Für die Unterstützung der Klarheit und Durchsichtigkeit ist eine maximale Schallwegdifferenz von ca. 27 m (~80 ms) anzusetzen. Schalleinfall, der im Publikum seitlich eintrifft verbessert die Räumlichkeit. Um das gegenseitige Hören der Darstellenden untereinander zu verbessern müssen Bühnenbegrenzungen, seitlich oder/und oberhalb der Bühne, geschaffen werden.

Die Begrenzungen der Bühne haben die Aufgabe, das Klangbild gut zu durchmischen und sowohl den Schall in den Zuhörerbereich, vor allem in die hinteren Reihen zu transportieren als auch das gegenseitige Hören der Musiker und Sänger zu ermöglichen. Die Gestaltungsart

und Größe der bühnenbegrenzenden und bühnennahen Flächen sind bestimmend für Klangdurchmischung und -abstrahlung ins das Publikum sowie für den Bühnenkontakt der Darstellenden.

Eine Klangdurchmischung und Schallabstrahlung ins Publikum wird durch schallharte ausreichend große und gegliederte, bzw. für mittlere und hohe Frequenzen diffus wirkende Flächen erreicht. Hierdurch wird die Balance zwischen den einzelnen Orchestergruppen verbessert, die gerichtete Schallabstrahlung einzelner Instrumentengruppen wird gemildert und die Einzelklänge werden in den Gesamtklang gemischt.

Eine gute Klangdurchmischung ist vor allem auch daher erforderlich, da es eher schwierig ist, einer ausgedehnten Schallquelle, wie Orchester und Chor, einem oder mehreren Reflektorflächen zuzuordnen und eine Zuordnung von jedem Sendepunkt zu jedem Empfangspunkt durch einen Reflexionsort ist eher unnötig.

Die Entfernung von Schallquelle zu Reflektor und Reflektor zum Empfangsort sowie die minimale zu reflektierende Frequenz ist ausschlaggebend, wie groß die Reflektorflächen dimensioniert werden müssen und wie „schwer“ das Material sein sollte.

Bei der Überlegung bis zu welcher unteren Frequenz die Deckensegel wirksam werden sollen, sollten folgende Aspekte berücksichtigt werden.

Für eine bessere Durchsichtigkeit von Musik aber auch besonders für Sprache sind vor allem die mittleren und hohen Frequenzen ausschlaggebend. Des Weiteren ist zu bedenken, dass die tiefen Frequenzen bei der Ausbreitung über das Publikum weniger geschwächt werden, als die hohen.[3]

Ein weiterer Aspekt ist die Betrachtung der Nachhallzeit. Ein leichter Anstieg der Nachhallzeit zu den tiefen Frequenzen wird wahrscheinlich gegeben sein, je nachdem welche Maßnahmen umgesetzt werden können. Die Dimensionierung der Reflexionsflächen sollte also auch immer im Zusammenhang mit der vorhandenen Nachhallzeit geschehen.

Diese zusätzlichen schallreflektierenden Flächen können durch Deckensegel und Stellwände im Bühnen- und Publikumsbereich realisiert werden.

Ebenfalls als Bühnenbegrenzungsflächen können Stellwände dienen. Die fördern das gegenseitige Hören auf der Bühne und reduzieren, die Anregung des Nachhalls in Seitenbereiche.

Ein Vorteil von Reflektoren besteht darin, dass man sich bei ihrem Vorhandensein auch einen größeren Nachhall leisten kann.

---

[3] Die geschilderten Erfahrungen bestätigen dies, auf den hinteren Plätzen sind hauptsächlich die tiefen Frequenzen bzw. die tieffrequenten Instrumente zu hören.

6.1.4 Störende Reflexionen

Bei der Betrachtung von späten Reflexionen, ist zu bedenken, dass späte Reflexionen nicht automatisch störende sind. Gerade im Rahmen musikalischer Darbietungen hat der Nachhall, wozu die späten Reflexionen zählen, eine positive Bedeutung.

Störend werden späte einzelne Reflexionen dann wenn sie aus dem Nachhall hervortreten.

Durch die Maßnahmen der gezielten Schalllenkung durch Deckensegel und Stellwänden werden die dahinter liegenden Raumteile abgeschattet und ein Großteil der späten Einzelreflexionen werden in ihrer störenden Wirkung verhindert.

Noch verbleibende Flächen von denen die Gefahr einer störenden Reflexion ausgehen kann sollten schallabsorbierend oder schallstreuend gestaltet werden. Störende Reflexionen sind vor allem aus dem Rückwandbereich (Westwand) zu erwarten. Aus diesem Bereich könnten störende Reflexionen zurück zur Bühne gelangen, aber auch die Gefahr eines Flatterechos zwischen Ost- und Westwand kann durch entsprechende Gestaltung vermindert werden.

Die Decke liefert aufgrund ihrer Höhe keine nützlichen Reflexionen und fördert eher die Gefahr störender Reflexionen. Es wird empfohlen, diese durch Strukturierung diffus zu gestalten. Eine Möglichkeit wäre Faltung der Decke.

Die strukturierte Gestaltung der Decke hat weiterhin den positiven Effekt, dass das Nachhallfeld an Diffusität gewinnt.

6.2 Einzelne Maßnahmen und Anforderungen

6.2.1 Deckenbereich

Zur Senkung der Nachhallzeit sollte das Dachvolumen von 15000 m³ abgetrennt werden. Dadurch reduziert sich das Volumen um ein Drittel des bisherigen Volumens. Da die Deckenhöhe mit mindestens 23 m (Höhe der Säulenarkaden) zu hoch liegt, um nützliche Reflexionen bis 80 ms zu liefern, sollte die Decke strukturiert gestaltet werden. Eine diffuse Gestaltung reduziert ebenfalls späte starke Einzelreflexionen und fördert ein gleichmäßiges diffuses Nachhallfeld. Eine diffuse Gestaltung der Decke ist zum Beispiel möglich durch

Faltung der Decke oder andere gestalterische Möglichkeiten, welche die Decke grob strukturieren.

Die Decke liefert eine große Fläche zur Unterbringung von Absorption. Vor allem sollte hier die in der Kirche notwendige tieffrequente Absorption untergebracht werden. Der hierfür nötige Platzbedarf bzw. Deckentiefe ist vorhanden. Möchte man die noch nötige mittel- und hochfrequente Absorption in der Decke unterbringen, dann sollte sie, wenn keine Strukturierung der Decke erfolgt, gleichmäßig über die Decke verteilt werden, z.B. abwechselnd. Dieser Wechsel von absorptiven und schallharten Flächen hat ebenfalls eine diffuse Wirkung. Es wird aber empfohlen, die zusätzlich nötige mittel- und hochfrequente Absorption zuerst in Raumbereiche zu verteilen, an denen störende Reflexionen zu erwarten sind.

Für den Aufbau der Decke sind verschiedene Materialien denkbar, die, um tieffrequente Absorption zu erzielen, als Plattenschwinger oder Lochplattenschwinger aufgebaut sind. Je nach Wahl des Materials und der zu erzielenden Absorption sind entsprechende Luftraumtiefen zur dahinter liegenden schallharten Wand zu wählen. Durch Variation der Luftraumtiefe, z.B. wenn die Platte über die Länge an Luftraumtiefe zunimmt, ist ein breiterer Frequenzbereich abdeckbar.

Bei der Wahl des Materials spielen auch bautechnische Aspekte eine Rolle die im Rahmen dieser Magisterarbeit bei der beispielhaften Ausführung nicht berücksichtigt werden können.

Für die Simulation wurde als Material Gipskarton gewählt. Das Datenblatt des verwendeten Materials Rigips befindet sich im Anhang.

Die Absorptionswerte beziehen sich auf einen schallharten Hintergrund. Die realen Werte, wenn eine doppelschalige Ausführung (mit ausreichend schallhartem „Hintergrundsfläche“) erfolgt, können davon abweichen.

Eine weitere Möglichkeit um gezielte tieffrequente Absorption zu erreichen ist die Unterbringung von so genannten Helmholtzresonatoren in der Decke. Genügend Raum ist hierfür vorhanden um einzelne abgeschlossene Luftraumvolumen, entsprechend der zu absorbierenden Frequenzen angepasst, oberhalb der Decke anzubringen, die dann durch entsprechende Löcher an den Kirchenraum angekoppelt sind.

6.2.2 Deckensegel über der Bühne

Reflektoren über der Bühne sollen sowohl den Direktschall unterstützen (Lautstärke) als auch frühe Reflexionen bis 80 ms schaffen (Klarheit, Durchsichtigkeit). Eine entsprechende Gestaltung der Reflektoren dient auch zur Regulierung der Balance zwischen den Orchester- und Chorgruppen.

Durch diese Reflektoren wird der Schall vorrangig in den Zuhörerbereich transportiert und eine Abschattung in dahinter liegende Raumbereiche und den Deckenbereich erreicht.

Es sollte mindestens ein Drittel der Bühnenfläche abgedeckt werden und die Segel sollten maximal 10 m über der Bühne aufgehangen werden.

Die Deckensegel sollten eine Mindestgröße von 5 bis 10 m² bzw. eine Mindestbreite von 3 m haben, hiermit werden spiegelnde Reflexionen bis zu den mittleren Frequenzen auch für hintere Plätze erreicht (Fresnelsche Zonenberechnung[4]). Aber auch unterhalb der Grenzfrequenz werden noch Anteile reflektiert, da eine Fläche erst dann jegliche, also auch diffuse Reflexionswirkung verliert, wenn sie kleiner als die halbe Wellenlänge ist. Dies wäre bei 3 m bei ca. 50 Hz.

Die Winkelung der Reflektoren ist abhängig von Höhe und Ort der Aufhängung. Eine variable Aufhängung macht eine spätere Justierung der Reflektorwinkel möglich.

Wenn die Deckensegel über eine sehr große Fläche verfügen, sollte die Oberfläche für mittlere und hohe Frequenzen strukturiert ausgelegt werden.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, eine gesamte Reflektorfläche in mehrere kleinere Reflexionsflächen (und somit falls nötig in leichter handhabbare Reflektoren) aufzulösen, die nebeneinander und hintereinander gehängt werden und zusammen den Reflektor bilden. Zu bedenken ist dabei, dass damit eine Abschwächung tieffrequenten Reflexion einhergeht, auch abhängig davon, wie dicht die einzelnen Segel nebeneinander hängen.

Dennoch ist hier eine reflektierende Wirkung zu erwarten, da der Reflektor erst dann jegliche (also auch diffuse) Reflexionswirkung einbüßt, wenn seine Breite kleiner ist, als die halbe Wellenlänge des auffallenden Schalls. [vgl. Cremer 1953] Somit werden auch bei kleineren Flächen Anteile der Frequenzen reflektiert.

Eine leichte Wölbung nach unten fördert die Diffusität und verbreitert den durch den Reflektor abgedeckten Bereich. Bei Aufteilung in mehrere Reflektorflächen wird ebenfalls

---

[4] Der Einsatz der geometrisch reflektierenden Wirkung lässt sich über die Fresnelsche Zonenberechnung anhand von Reflektorbreite, Reflexionseinfallswinkel, Entfernungen von Quelle, Reflektor und Empfangspunkt ermitteln.

eine gewisse Diffusität und somit Klangdurchmischung gefördert, da an den Segelrändern Streuwellen erzeugt werden.

Das Material für die Deckensegel sollte schallhart und biegesteif sein und mindestens ein Flächengewicht von 10 kg/m² haben, um für mittlere Frequenzen wirksam zu sein und mindestens 20 kg/m² und auch für tiefe Frequenzen reflektierend zu wirken.
Mögliche Materialien wären z.B. Spanplatte, MDF-Platte, Holz, Plexiglas oder Glas usw.

Auch wenn Platten mit einer schweren Plattenmasse vorteilhafter für die Reflexion von tiefen Frequenzen sind, so hat die Verwendung von Plexiglas, welches, je nach Plattenstärke, ein geringere Masse aufweist, doch den architektonischen Vorteil, dass sie nahezu „unsichtbar" sind. Trotz ihrer geringen Plattenstärke und somit höher liegenden Grenzfrequenz für Reflexionen können sie gewinnbringend eingesetzt werden, wie das Beispiel im Herkulessaal zeigt. [Cremer 1953]

Eine zusätzliche horizontale Reflektorfläche zwischen Bühne und Auditorium kann die Schallversorgung besonders für die hinteren Publikumsplätze verbessern. Die Höhe sollte ungefähr bei ca. 10 m liegen.

In Abb. 26 ist eine mögliche Anordnung der Reflektorflächen simuliert worden. Es sind drei Reflektorflächen, die jeweils für einen Teil Bühnenfläche auf die Publikumsfläche ausgerichtet sind.

Die Deckensegel haben in diesem Ausführungsbeispiel keine absorptive Belegung auf der Rückseite.

6.2.3 Deckensegel seitlich zwischen den Säulen

Deckensegel können auch zwischen den Säulen untergebracht werden. Diese seitlichen Deckensegel seitlich können ebenfalls die nützlichen Reflexionen fördern und erhöhen aufgrund des seitlichen Schalleinfalls die Räumlichkeit.

Wenn sie in ihrer Größe der Säulenbreite angepasst werden und eine geringere Breite als 2,5 m erhalten, welche dann auch erst für hohe Frequenzen reflektierend wirken, dann kann das verwendete Material auch über ein geringeres Flächengewicht verfügen. Hier ist ein Flächengewicht von ca. 5 kg/m² ausreichend. Es ist auch ein spezieller reflektierender Vorhangstoff möglich. Der dadurch eingeschränkte Reflexionsbereich auf hohe Frequenzen ist dennoch förderlich für die Durchsichtigkeit.

Die seitlichen Segel sollten auf einer Höhe von ca. 6 bis 8 m hängen. Durch Biegung der Reflektoren kann ein breiterer Publikumsbereich erreicht werden und auch Plätze im Seitenschiff können noch mit Schall versorgt werden.

In der Simulation wurden keine seitlichen Deckensegel verwendet. Die Möglichkeit sollte hier dennoch aufgezeigt werden.

6.2.4 Stellwände um Bühne und Auditorium

Stellwände seitlich der Bühne stellen den Bühnenkontakt zwischen den Darstellenden her und fördern das gegenseitige Verstehen. Je nach Ausrichtung können sie auch nützliche Reflexionen für das Publikum liefern.

Stellwände seitlich des Auditoriums grenzen die Publikumsfläche ein und liefern nützliche Reflexionen. Diese sind besonders für den hinteren Publikumsbereich förderlich.

Dies gilt auch für Stellwände hinter der Publikumsfläche. Diese vermindern ebenfalls Reflexionen die in den Rückwandbereich bzw. hinteren Eingangsbereich gehen und dort verspätete Reflexionen, Echos oder Flatterechos verursachen können. Es ist aber darauf zu achten, dass diese Stellwände nicht selbst zur Quelle für schädliche Rückwürfe zurück in den Bühnenbereich werden. Eine parallele Aufstellung gegenüber der Bühne sollte vermieden werden.

Die Stellwände haben für die verschiedenen Aufstellplätze unterschiedliche Anforderungen. Aber sie können, wenn bestimmte Mindestanforderungen erfüllt sind, auch gleich ausgeführt werden und sind somit variabel einsetzbar.

Die Mindesthöhe für den Publikumsbereich sollte 2 m betragen. Die Stellwände im Bühnenbereich sollten ebenfalls mindestens 2 m betragen, um eine Abschattung in den rückwärtigen und seitliche Raumbereich sollten sie mindestens 2,5m, besser jedoch 3 m hoch sein. Stellwände hinter dem Chor sollten 0,5 m höher als die Köpfe der Choristen sein. [vgl. Meyer 2003, S.264]

Die einzelnen Wandelemente sollten dicht beieinander aufgestellt werden, damit auch tiefe Frequenzen reflektiert werden. Eine Abwinkelung der nebeneinander stehenden Elemente ist vorteilhaft, aber nicht unbedingt erforderlich.

Möchte man die Stellwände zur Unterbringung von Absorption nutzen, dann sollte die vordere Seite, die Publikums und Bühnensichtseite, schallhart sein, die Rückseite kann schallabsorbierend gestaltet werden. Die reflektierende schallharte Platte sollte ein Flächengewicht von mindestens 10kg/m² haben. Für die absorbierende Seite sind alle Materialien die auch für Wandverkleidungen eingesetzt werden nutzbar. Die Auswahl ist groß und das Material kann entsprechend der Absorptionsdimensionierung im Raum und somit erforderlichen Absorptionsfrequenzgang gewählt werden. Durch eine doppelwandige

Ausführung mit Hohlraum, ab 5 cm, besser 10 cm oder mehr, kann auch tieffrequente Absorption erreicht werden. [ebd.]

Besonders die variable Einsetzbarkeit der Stellwände macht diese zu einer nützlichen Maßnahme. Sie erfüllen ihre Zwecke sowohl für größere als auch für kleinere Publikumsflächen. Besonders, wenn weniger Publikum vorhanden ist, können sie durch Eingrenzung der Fläche und/oder Abtrennung von Bereichen sehr zu Förderung der Verständlichkeit von Sprache oder Durchsichtigkeit und Klarheit von Musik beitragen.

Die Stellwände können ebenfalls als Ausstellungstafeln genutzt werden, wenn sie z.B. durch Metallausführung zu Magnettafeln werden.

6.2.5 Vorhänge

Vorhänge o.ä. Einbauten, die absorbierend oder streuend wirken, sollten in den Rückwandbereich gehängt werden. Dies verhindert Reflexionen die verspätet im Bühnenbereich eintreffen ebenso wie Flatterechos zwischen Ost- und Westwand

Die Absorptionswirkung des Stoffes ist abhängig vom Strömungswiderstand und Flächengewicht des Stoffes. Je schwerer der Stoff ist, desto höher ist die absorptive Wirkung und je größer der Wandabstand ist, desto weiter zu den tieferen Frequenzen wird die Absorption wirksam.

Um eine nennenswerte absorptive Wirkung zu erzielen, sind ein Flächengewicht von mindestens 350 g/m² und ein Strömungswiderstand zwischen 40 und 80 Rayl empfehlenswert. [Cremer 1978] Der Stoff sollte also möglichst dick und dicht sein, jedoch nicht völlig luftundurchlässig. [Meyer 2003]

Besonders wichtig für die Absorption auch zu tiefen Frequenzen ist ein genügend großer Wandabstand. Der Vorhang sollte mit mindestens 10 bis 20 cm Abstand vor der Wand hängen.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung von durchsichtigen Folienrollos mit Mikroperforierung. Diese Folienrollos können sowohl freihängend als auch gespannt vor der Wand angebracht werden. Hier gilt ebenso, wie bei den Vorhängen, dass ein größerer Wandabstand das Maximum der Absorption weiter in den tieffrequenten Bereich verschoben wird. Eine zweilagige Ausführung mit ca. 30 cm Abstand zwischen den Folien lässt die Absorptionsfrequenz weiter sinken und eine breitbandigere Absorption erzielen.

6.2.6 Polsterstühle

Polsterstühle gewährleisten eine annähernd gleich bleibende Nachhallzeit bei variabler Besetzung. Dies natürlich nur, wenn die leer stehenden Stühle nicht weggeräumt werden.

6.2.7 Podeste und Treppen auf der Bühne

Für eine ungehinderte Schallabstrahlung tragen Chortreppen und Podeste für die Musiker bei.

Die Bühne befindet sich schon auf einer etwas höheren Plattform (Stufen), jedoch ist das Kirchenschiff nach hinten abfallend.

Die bereits verwendeten Chortreppen sind sehr förderlich für die Direktschallabstrahlung. Das Orchester befindet sich auf nahezu gleicher Höhe wie das Publikum. Dies führt vor allem für die hinteren Plätze zu einem undurchsichtigeren Klangbild und schwächt die klangliche Ausgewogenheit zwischen Chor und Orchester und stört die Balance zwischen einzelnen Orchestergruppen, vor allen zwischen Streicher und Bläser.

Um diese Umstände zu verbessern, können auch für das Orchester Podeste und eine Höhenstaffelung empfohlen werden.

Das Orchester sollte mindesten 40 cm, besser noch 60 bis 80 cm erhöht sein. Bei großer Orchesterbesetzung verbessert eine zusätzliche Stufe von 40 cm die Direktschallabstrahlung der Holzbläser.

Der Reihen des Chores sollten mit einem möglichst steilen Anstieg gestaffelt sein, gut wäre ein Anstieg von ca. 45°. Dieser Anstieg ist zum einem nützlich für die ungehinderte Schallabstrahlung ins Publikum und hat zudem den Vorteil, dass eine Abschattung von Chor und Orchester in hintere Raumbereiche erfolgt.

Die Podiumsplatten sollten möglichst wenig mitschwingen. Ein Teppich auf den Chorstufen ist zur Geräuschbekämpfung empfehlenswert und beeinträchtigt nicht den Chorklang.

Beim Orchester sollte kein Teppich liegen, weil die Fußbodenreflexion zur Unterstützung des gegenseitigen Hörens benötigt wird

6.3 Ergebnisse der Maßnahmen

Die hier empfohlenen Maßnahmen wurden mit dem Simulationsprogramm ermittelt und simuliert. Hierbei kann abgeschätzt werden, in welchem Rahmen die gewünschten Verbesserungen durch die Maßnahmen erzielt werden können. Die in der Simulation verwendeten Absorptionsgrade der Maßnahmen mit ihrer jeweils belegten Flächengröße sind in Tab. 9 gelistet. Der angegebene Flächenanteil an der Gesamtfläche im Kirchenraum macht deutlich, wie groß der Einfluss der jeweiligen Absorption auf die Gesamtabsorption ist. Die rückseitigen Flächen von Vorhang, Deckensegel und Stellwände sind in der Simulation schallhart mit einem $\alpha \sim 0$ eingesetzt, da die Absorption nur einmal angerechnet werden kann.

Tab. 9: Absorptionswerte der Maßnahmen (Ausführungsbeispiel)

belegte Flächen -größe	Flächen -anteil	verwendetes Material	Oktavband-Mittenfrequenz [Hz]					
			125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
1340 m²	11,4 %	Gipskarton, 100mm LT	0,39	0,13	0,04	0,02	0,03	0,04
72 m²	0,6 %	Vorhang, 25 cm vor Wand	0,30	0,60	0,75	0,60	0,70	0,75
145 m²	1,2 %	Stellwand, absorbierend (OWA Tecta perfora)	0,37	0,65	0,66	0,41	0,35	0,17
90 m²	0,75 %	Deckensegel, reflektierend	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02

Für die Simulation wurden die Absorptionsdaten von Rigips Bauplatten verwendet. [siehe Datenblatt im Anhang] In der Simulation ist die Decke als ebene Fläche eingezeichnet. Wenn die Decke zum Beispiel gefaltet wird, dann erhöht sich die Gesamtfläche und somit Absorption. Die Absorptionsdaten für den Vorhangstoff sind Meyer entnommen. [Meyer 2003, S. 175] Für die Stellwände wurde das Material Dessin Typ perfora von OWA verwendet, eine mikroperforierte Metallkassette. [siehe Datenblatt im Anhang] Die

Absorptionsdaten sind für Konstruktionen vor einer schallharten Wand mit einer Luftraumtiefe von 200 mm angegeben. Bei Konstruktion für doppelwandige Stellwände weichen die Absorptionsdaten hiervon ab. Spezielle Absorptionsdaten für den Aufbau von Stellwänden konnte nicht gefunden werden. Die Werte für die Deckensegel wurden für ein schallhartes Material mit minimaler Absorption angenommen, auch für tiefe Frequenzen, da die Segel frei hängend sind.

Die aus diesen angenommenen Materialien und Flächenbelegungen resultierende Nachhallzeit ist in Abb. 21 zu sehen.

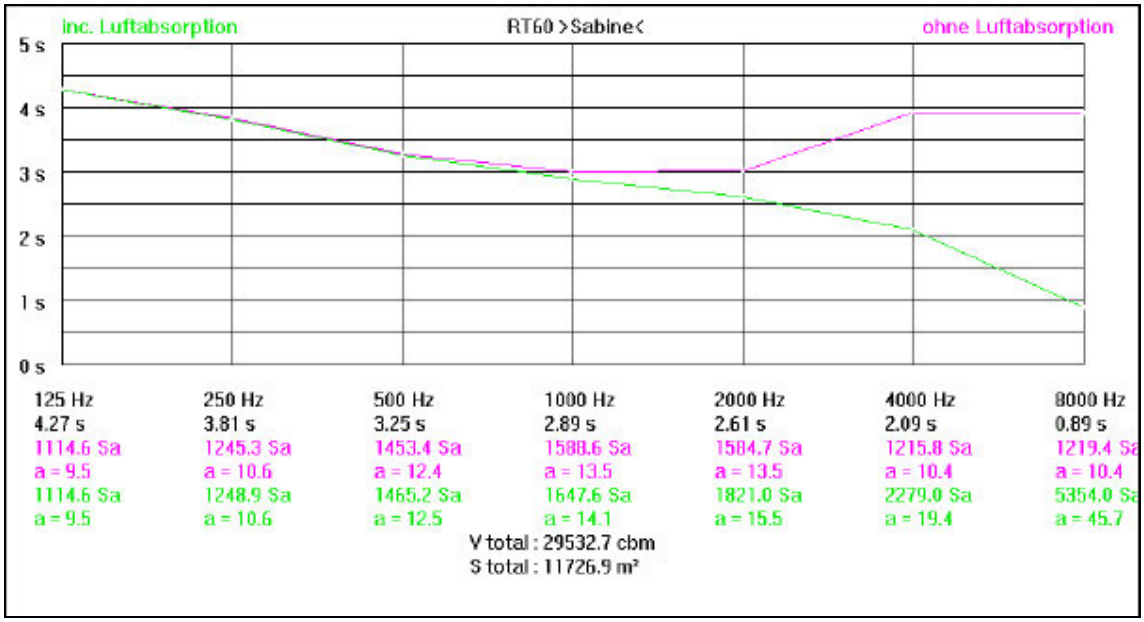


Abb. 21: Nachhallzeit der besetzten Kirche mit Maßnahmen

Die Nachhallzeit für mittlere Frequenzen liegt über der angegebenen Nachhallzeit. Wie bereits erwähnt, ist eine höhere Nachhallzeit zulässig, wenn durch Deckensegel frühe Reflexionen gefördert werden. Eine weitere Senkung der Nachhallzeit wäre zum Beispiel durch weitere Stellwände oder Vorhänge möglich. Zu bedenken wäre hierbei, dass dadurch aber vorrangig die mittleren und hohen Frequenzen bedämpft werden und der Anstieg der Nachhallzeit zu den tiefen Frequenzen steiler werden würde.

Für den leeren Kirchenraum und ebenfalls entfernten Vorhängen und Stellwänden stellt sich eine Nachhallzeit ein, die in Abb. 22 zu sehen ist. Die Nachhallzeit für mittlere Frequenzen liegt im unteren Bereich der von J. Meyer empfohlenen Nachhallzeit für leere Kirchen.

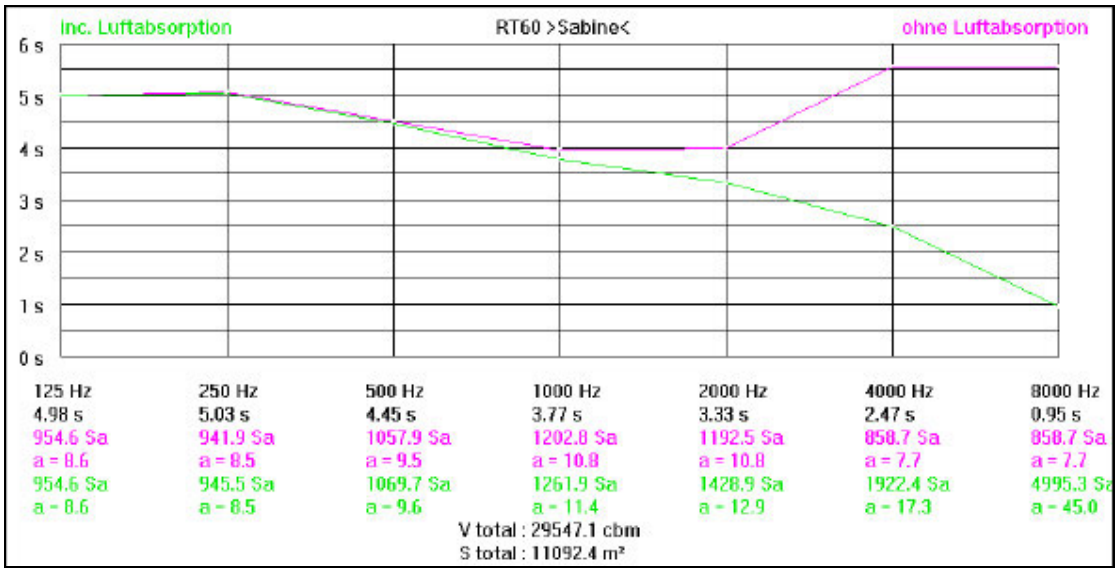


Abb. 22: Nachhallzeit der unbesetzten Kirche, mit Zwischendecke, ohne Vorhänge und Stellwände

In den Abb. 23 bis Abb. 25 sind verschiedene Ansichten der Simulation mit Maßnahmen zu sehen.

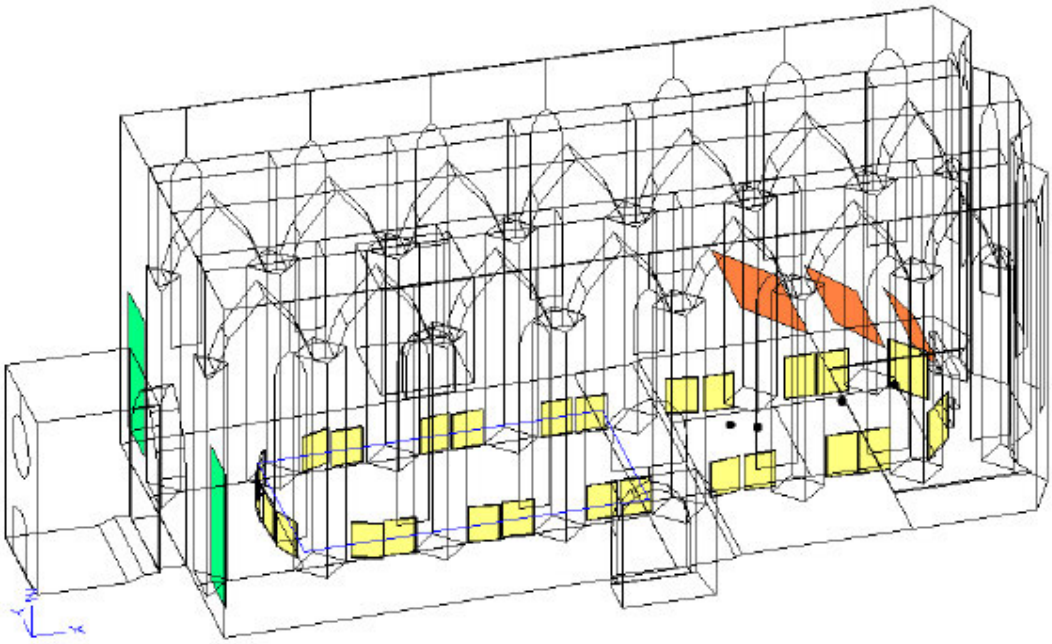


Abb. 23: 3D-Simulationsmodell der Marienkirche mit Maßnahmen: abgehangene Decke, Deckensegel über der Bühne (orange), Stellwände (gelb), Vorhänge (grün)

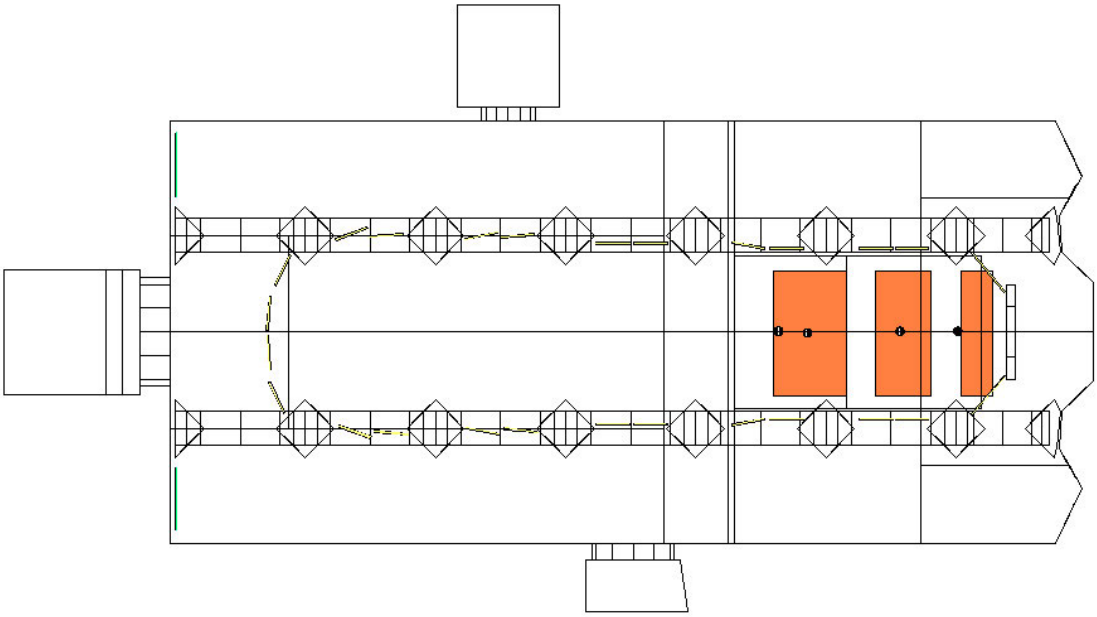


Abb. 24: Simulationsmodell der Marienkirche (Grundriss) mit Maßnahmen: abgehangene Decke, Deckensegel über der Bühne (orange), Stellwände (gelb), Vorhänge (grün)

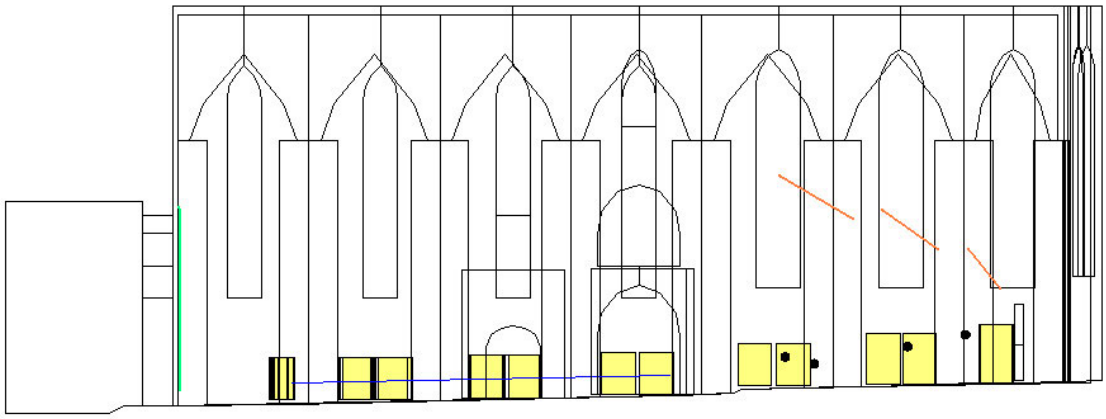


Abb. 25: Simulationsmodell der Marienkirche (Querschnitt) mit Maßnahmen: abgehangene Decke, Deckensegel über der Bühne (orange), Stellwände (gelb), Vorhänge (grün)

In Abb. 26 sind für drei Sendepositionen auf der Bühne die Reflexionsausrichtungen der Deckensegel für vordere, mittlere und hintere Sitzplätze dargestellt. Es wurde hierfür die erste Reflexion simuliert. Der erste Reflekor von links hängt auf einer Höhe von ca. 10 m über der Schallquelle. Er hat eine Breite von 5 m und ist um 30° gewinkelt. Der mittlere Reflektor ist ca. 7 m über der Schallquelle (Kopfhöhe) aufgehangen. Er ist ca. 4 m breit und hat einen

Winkel von 35°. Der dritte Reflektor ist ca. 3,5 bis 4m über der hinteren Schallquelle angebracht. Er misst eine Breite von 3m und ist mit 50° gewinkelt.

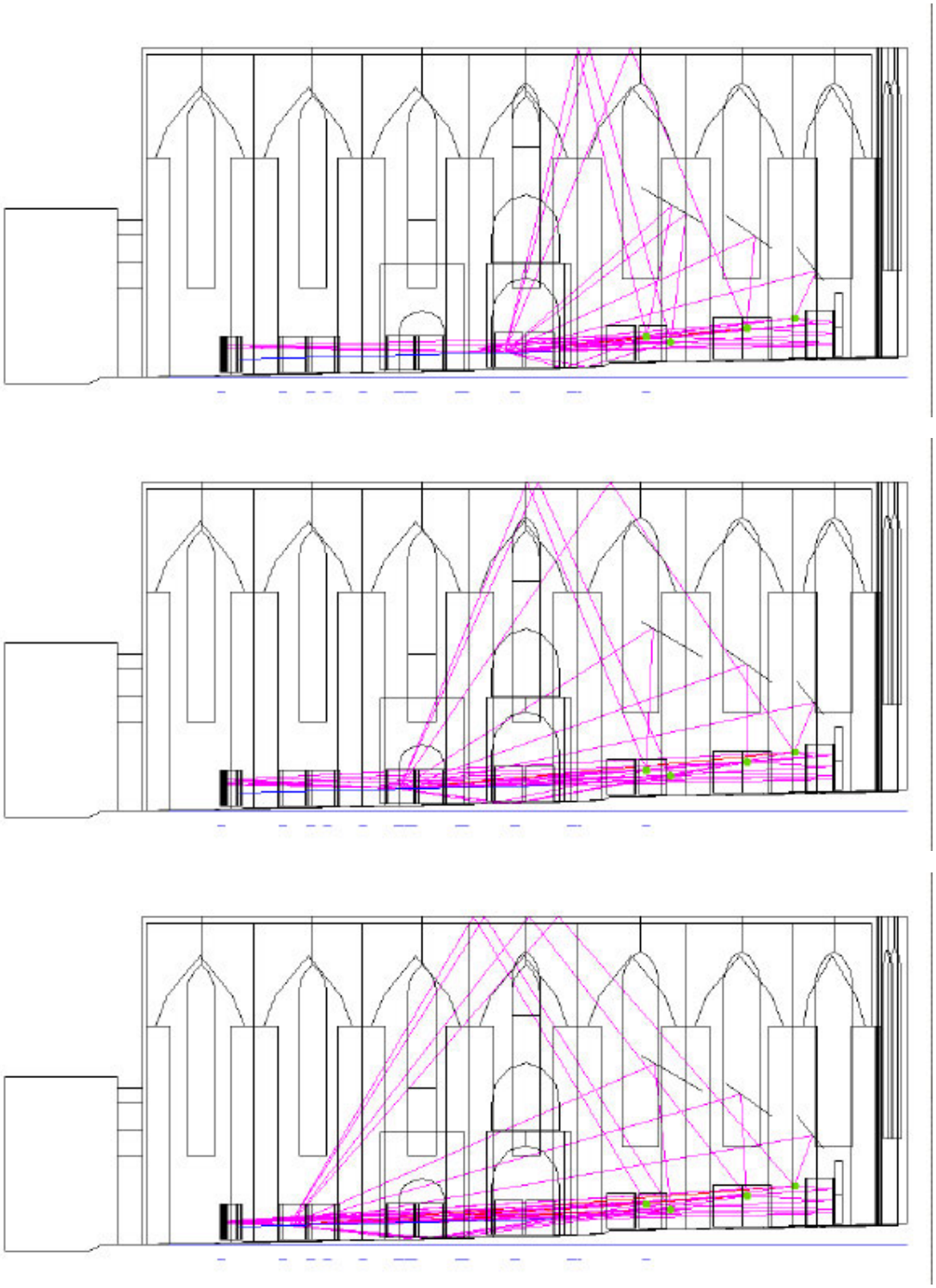


Abb. 26: Reflexion der Deckensegel für vordere (obere Grafik), mittlere (mittlere Grafik) und hintere Plätze (untere Grafik)

Um das veränderte Reflexionsverhalten aufgrund der Deckensegel und Stellwände zu sehen, wird exemplarisch für die Empfangsposition E5 und einer Sendeposition aus dem mittleren Bühnenbereich das Reflektogramm bis zur dritten Ordnung erstellt.

Man erkennt, dass durch die Bühnen- und Auditoriumseingrenzung mit den Stellwänden und durch die Deckensegel die Anzahl der zeitigen Reflexionen erhöht wird. In der Simulation in

Abb. 29 kann man sehen, dass die Gefahr von kritischen Reflexionen besteht, die über die Deckensegel in den Eingangsbereich an der Rückwand reflektiert wird. Dieser Bereich sollte, wenn es möglich ist, ebenfalls durch entsprechende absorptive Maßnahmen verdeckt werden. Die starken Reflexionen bei 270 ms (Laufzeit 190ms) entstehen durch Mehrfachreflexion zwischen Decke und Fußboden. Wenn die Decke diffus gestaltet wird, sind von diesen Schallwegen keine störenden Reflexionen zu erwarten.

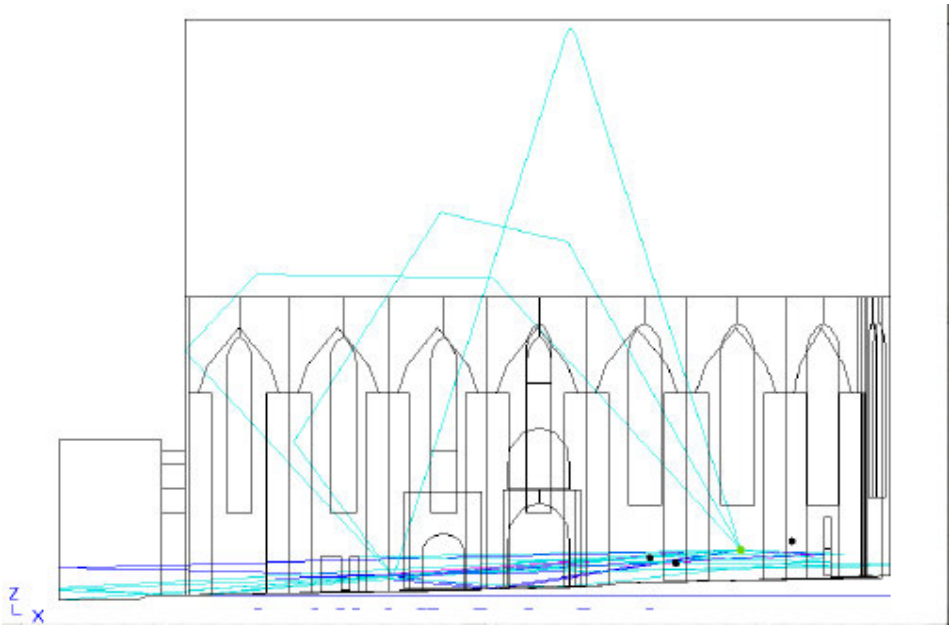


Abb. 27: Reflexionen bis zur 3.Ordnung für E5, ohne Maßnahmen

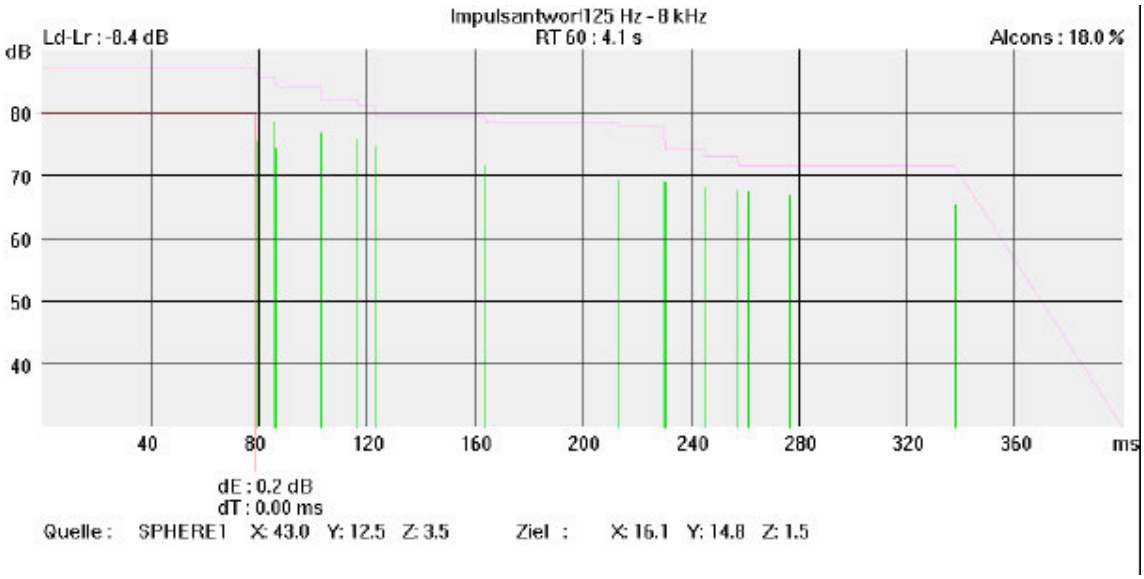


Abb. 28: Reflektogramm bis zur 3.Ordnung für E5, ohne Maßnahmen

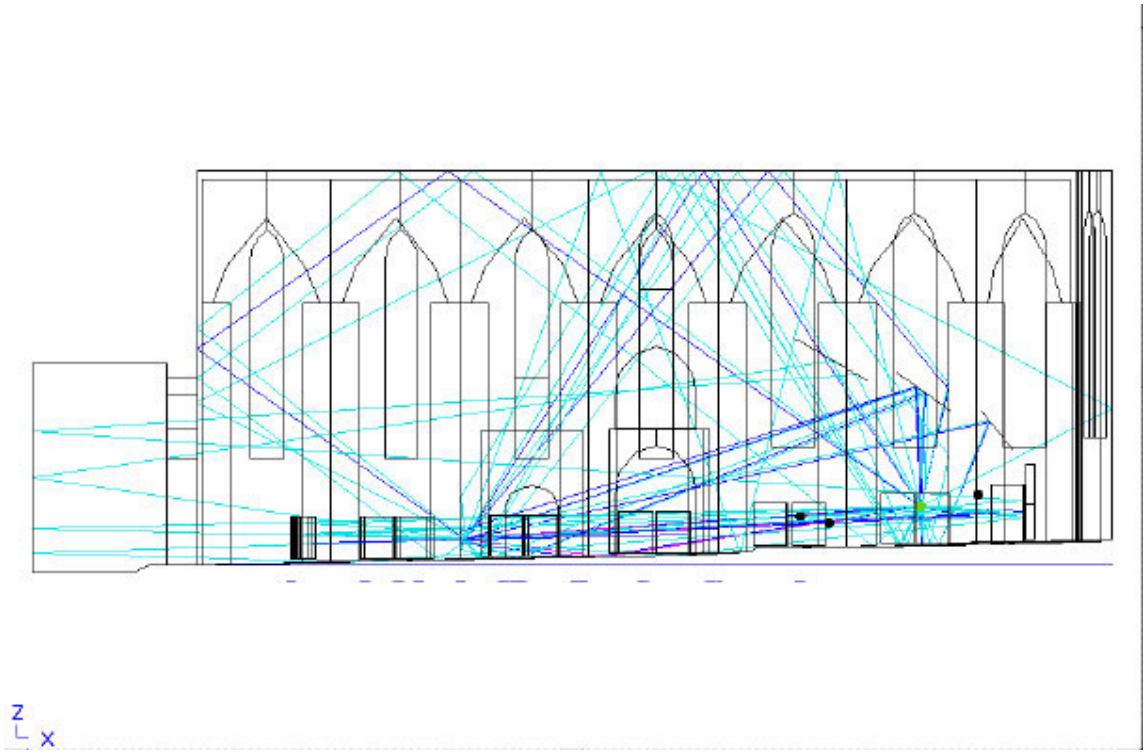


Abb. 29: Reflexionen bis zur 3.Ordnung für E5, mit Maßnahmen

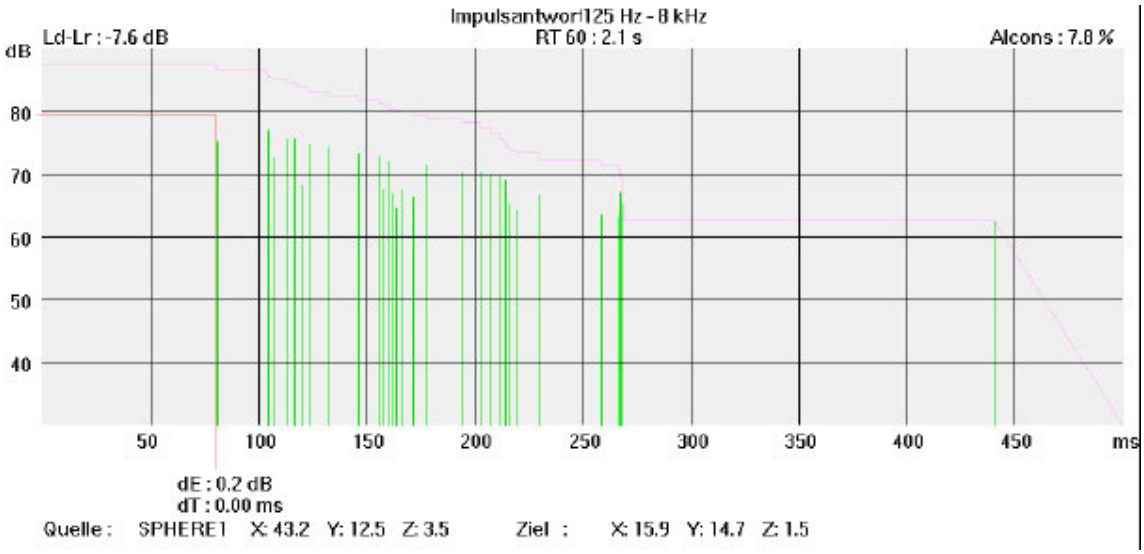


Abb. 30: Reflektogramm bis zur 3.Ordnung für E5, mit Maßnahmen

In den Abbildungen Abb. 31 bis Abb. 33 ist für die Sendeposition 1 und Empfangsposition 1, wie sie bei den Messungen verwendet wurden, eine Gegenüberstellung der gemessenen Impulsantwort, der simulierten Impulsantwort (40. Ordnung) und die Impulsantwort mit simulierten Maßnahmen (40. Ordnung) dargestellt. Im Reflektogramm mit den simulierten Maßnahmen erkennt man, dass die Anzahl der zeitigen Reflexionen zunimmt. In beiden Simulationen wurde für den besetzten Zustand gerechnet. Die über dem Reflektogramm angegebene Nachhallzeit wird aus der mittleren freien Weglänge der Reflexionspfade ermittelt. Die Nachhallzeit von 4,3 s in Abb. 32 entspricht der gemittelten Nachhallzeit für die gemessene Nachhallzeit mit Personen. Die ermittelte Nachhallzeit von 2,8 s für die Kirche mit Maßnahmen in Abb. 33 fällt kürzer aus als die gemittelte Nachhallzeit mit der Sabin'schen Berechnung mit 3,2 s. Hier kann man erkennen, dass zusätzliche Reflektoren die „tatsächliche" Nachhalldauer an einem Hörerplatz verkürzen können. Daher ist eine höhere Nachhallzeit zulässig, wenn zusätzliche Reflektoren vorhanden sind.

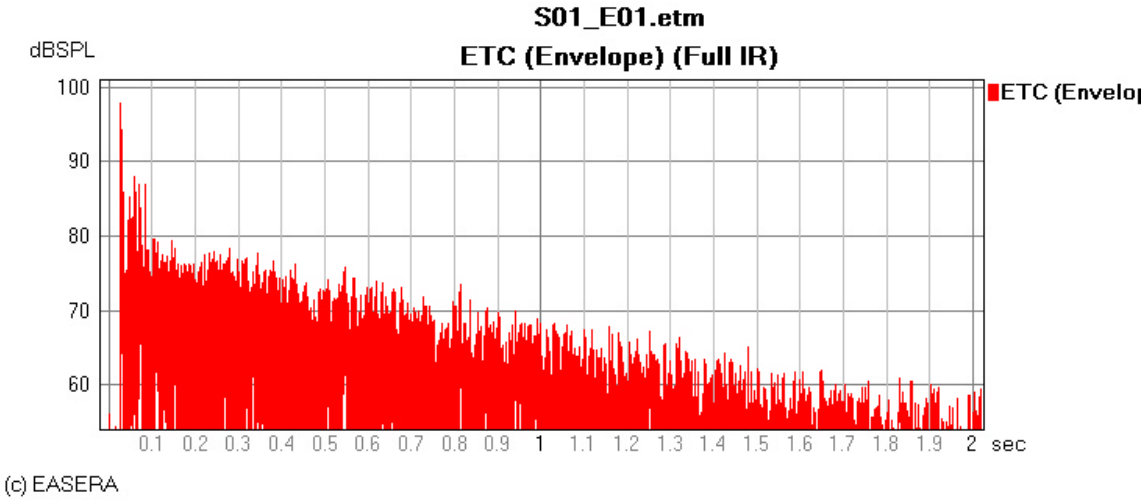


Abb. 31: gemessenes ETC für die Sendeposition 1 und Empfangsposition 1

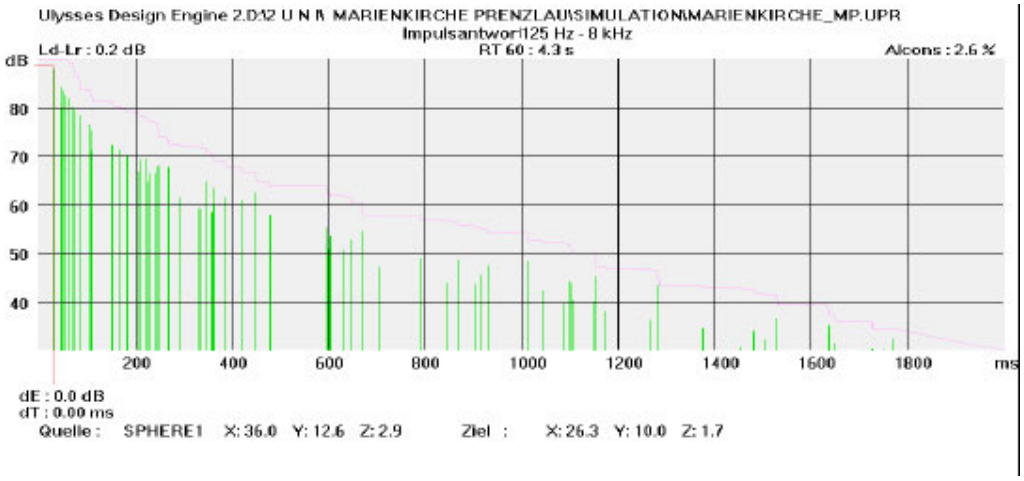


Abb. 32: simuliertes ETC für S1E1 für die Kirche (ohne Maßnahmen), Raytracing bis zur 40. Ordnung

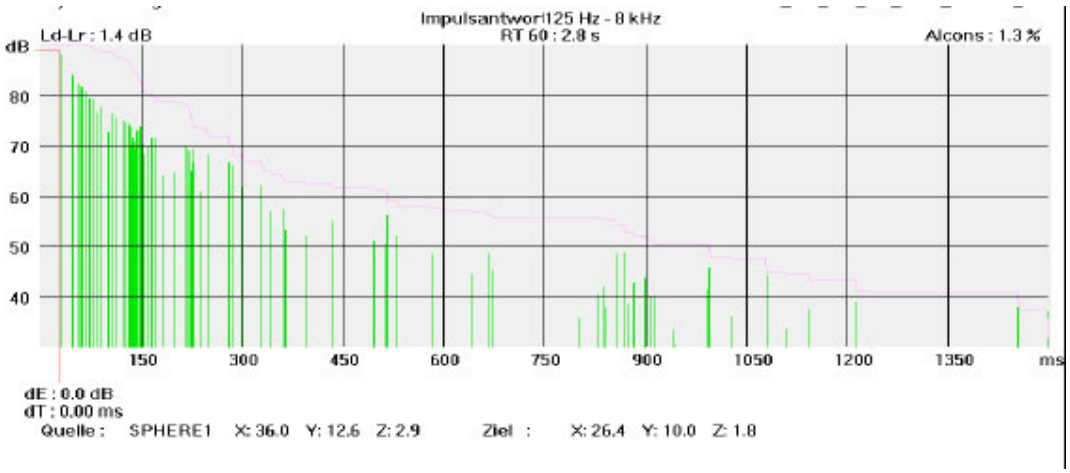


Abb. 33: simuliertes ETC für S1E1 für die Kirche mit Maßnahmen, Raytracing bis zur 40.

7 Zusammenfassung

Die als mangelhaft empfundene Akustik der Marienkirche zu Prenzlau und die damit verbundenen Wünsche nach deren Verbesserung, welche ein Nutzung als Veranstaltungsort für zum Beispiel Konzerte ermöglichen würde, stellte die Ausgangslage dieser Arbeit dar.

So wurde in der vorliegenden Arbeit die Raumakustik der Marienkirche anhand von raumakustischen Messungen und einer Computersimulation untersucht wie auch bewertet.

Dabei zeigte sich, dass die für die Nutzer der Kirche bereits als schlecht empfundene Akustik sich auch in den ermittelten Messergebnissen widerspiegelt. Daher wurden nach der Auswertung der akustischen Daten mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Hörsamkeit entworfen.

Die Messauswertungen zeigten, dass eine Ursache für die unangemessene Hörsamkeit die zu lange Nachhallzeit ist. Sie beträgt für den leeren Kirchenraum mit einem Volumen von 45000m³ bei mittleren Frequenzen 5,2 s. Selbst bei einer maximalen Besetzung mit ca. 1000 Personen ergibt sich eine Nachhallzeit von 4,0 s. Dieser Wert liegt über den empfohlenen Nachhallzeiten für Kirchen.

Maßgeblich für die lange Nachhallzeit ist das Fehlen des ursprünglich einmal vorhandenen Kreuzgewölbes. Hierdurch addiert sich zum ohnehin schon großen Volumen des Kirchenschiffes (30000 m³) das zusätzlich entstehende Volumen des Dachstuhls von 15000 m³ hinzu.

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass aufgrund der großen Dimensionen der Kirche (25 m x 55 m x 45 m) nützliche frühe Reflexionen nicht möglich sind. Die Seitenwände sind zu weit entfernt, um für die Durchsichtigkeit und Deutlichkeit nützliche Reflexionen zu liefern. Besonders die „offene“ Bühne führt zu einer ungünstigen Ausgangslage. Es sind keine bühnenbegrenzenden Flächen vorhanden, die den Schall in eine für das Publikum nützliche Richtung lenken könnten. Die allseitige Schallabstrahlung auch in Nachhall anregende Raumbereiche führt zum verspäteten Eintreffen der Schallenergie. Die hierdurch entstehende Klangqualität wird daher zu Recht mit Attributen wie „Klangbrei“ und „verwaschen“ versehen. Zudem wird durch die fehlenden Begrenzungsflächen das gegenseitige Hören der Musiker untereinander erschwert.

Um die Hörsamkeit zu verbessern wurden innerhalb dieser Arbeit mehrere Maßnahmen vorgestellt. Besonders erfolgsversprechend würde sich die Abkopplung des Dachvolumens, mittels einer abgehängten Decke auswirken, womit eine erwünschte Senkung der Nachhallzeit erreicht werden würde. Ebenso empfehlenswert wäre die Schaffung von schalllenkenden

Flächen im Bühnenbereich, wie Deckensegel und Stellwände. Diese würden nützliche Schallreflexionen schaffen. Mit diesen Maßnahmen wird sich die Hörsamkeit deutlich verbessern.

Falls eine Realisierung der erarbeiteten Empfehlungen angestrebt wird, muss dies selbstverständlich in Abstimmung mit architektonischen Vorstellungen und bautechnischen Möglichkeiten erfolgen.

8 Literaturverzeichnis

Bruckmeyer, Friedrich: Kirchen in: Handbuch der Schalltechnik im Hochbau; Verlag Franz Deuticke; Wien 1962; S.664-702

Cremer, Lothar: *Die Plexiglas-Reflektoren im neuen Herkulessaal der Münchener Residenz*; Die Schalltechnik; Nr. 5; Verlag; 1953; S.1-10

Cremer, Lothar; Müller, Helmut A.: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik*: *Geometrische, statistische und psychologische Raumakustik;* Hirzel Verlag; Stuttgart 1978

Fasold, Wolfgang; Kraak, Wolfgang; Schirmer, Werner (Hrsg.): *Taschenbuch Akustik Berlin*; (Bd. 1 & 2); 1.Auflage; VEB Verlag Technik; Berlin 1984

Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen;* Verlag für Bauwesen; Berlin 1998

Fasold, Wolfgang; Winkler, Helgo: *Bauphysikalische Entwurfslehre: Raumakustik*; Bd. 5; Verlag für Bauwesen, Berlin 1976

Feldmann, Joachim: *Raumakustik und baulicher Schallschutz*; Skript TU-Berlin, Institut für Technische Akustik, Berlin 2003

Finder, Enno: Untersuchung, *Beurteilung und Projektierung von Verbesserungsmaßnahmen der raumakustischen Situation in der Oberpfarr- und Domkirche zu Berlin*; Studienarbeit Universität Berlin, Institut für Technische Akustik; 1997

Goertz, Anselm: Ulysses im Test; Sonderdruck aus Professional System 5/99; IFBsoft Bischofsheim

Hartmann, Günther*: Praktische Akustik*: *Raum- und Bauakustik*; Bd. 2; R.Oldenbourg Verlag; München 1968

Keibs, L.; Kuhl, W.: *Zur Akustik der Thomaskirche in Leipzig*; Acoustica Vol. 9 (1959), S.365-370

Knudsen, Vern O.; Harris, Cyril M.: *Acoustical Designing in Architecture*; 2.Auflage; John Wiley & Sons; New York 1950

Meyer, Jürgen: *Kirchenakustik*; Verlag Erwin Bochinsky; Frankfurt/Main 2003

Meyer, Jürgen: *Der akustische Raum;* in: Umgang mit Raum: Dokumentation über den 16. Evangelischen Kirchenbautag; Verlagshaus Mohn; Kassel 1977

Thienhaus, E.: Artikel *„Raumakustik“* in MGG; Bd. 11; Kassel 1962 (zit. n. Meyer 2003, S. 144 f.)

Venzke, G.: *Die Raumakustik der Kirchen verschiedener Baustilepochen*; Acoustica Vol.9; 1959; S.151-154

Zorkóczy, Levente: *Hörsamkeit in Kirchen*; Merseburger Verlag; Berlin 1976

Software und Software-Hilfen

EASERA 1.0.60; Software Design Ahnert GmbHBerlin; www.easera.de

Ahnert, Wolfgang; Schmidt, Wolfgang: *Fundamentals to perform acoustical measurements, Appendix to EASERA*; Software Design Ahnert GmbH Berlin; 2005

EASERA Users Manual; Software Design Ahnert GmbH Berlin

EASERA Tutorial; Software Design Ahnert GmbH Berlin; 2006

Ulysses 2.82; IFBsoft Bischofsheim; www.ifbsoft.de

Ulysses Online Hilfe: Ulysses Design Engine; IFBsoft Bischofsheim

9 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Bewertung der Werte für STI und Alcons 19
Tab. 2: durchgeführte Messungen 27
Tab. 3: gemessene Nachhallzeit und Berechnung für übliche und maximale Besetzung 29
Tab. 4: Messauswertung objektiver Kriterien 32
Tab. 5: Verwendete Absorptionsgrade α der Materialien 45
Tab. 6: Verwendete Absorption α und A der Personen 46
Tab. 7: erforderliche zusätzliche äquivalente Schallabsorptionsfläche $S\alpha$ für den Fall einer eingezogenen Decke (V = 30000 m²), eingezogene Decke mit α=0 eingesetzt 51
Tab. 8: erforderliche zusätzliche äquivalente Schallabsorptionsfläche A für den Fall wenn keine Decke eingezogene ist (V = 45000 m²) 52
Tab. 9: Absorptionswerte der Maßnahmen (Ausführungsbeispiel) 63

10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: schematisierte Raumimpulsantwort [Grafik entnommen aus Fasold, 1998, S.149] .. 5

Abb. 2: empfohlener Nachhallzeitenbereich für Kirchen nach verschiedenen Autoren; oben und mittlere Grafik: für besetzte Kirchen, untere Grafik: für unbesetzte Kirchen [entnommen aus Meyer 2003, S.144] 10

Abb. 3: Vergleich der empfohlenen Nachhallzeit von Meyer und die stiltypische Bereiche gotischer Kirchen [entnommen aus Meyer 2003, S. 152]..... 10

Abb. 4: Einfluss unterschiedlicher Besetzungsdichte auf die empfohlene Nachhallzeit in unbesetzten Kirchen (nach 11

Abb. 5: Grenze zwischen nicht störenden und störenden einzelnen Schallrückwurf [entnommen aus Hartmann 1968, S. 40]..... 14

Abb. 6: Ansichten des Innenraumes der Marienkirche 22

Abb. 7: Messaufbau..... 26

Abb. 8: Messpositionen..... 26

Abb. 9: gemessene Nachhallzeit in der Marienkirche, V ≈ 45000 m³ 29

Abb. 10: Gegenüberstellung der empfohlenen Nachhallzeiten für besetzte und unbesetzte Kirchen bei einem Volumen von 45000 m³ 30

Abb. 11: überlagerte Darstellung von Weighted Energie und von Impulsantworten 34

Abb. 12: ETC bis 1 Sekunde, über alle Frequenzen für Sendeposition 1 und Empfangsposition 1,..... 36

Abb. 13: ETC über alle Frequenzen für Sendeposition 1 und Empfangsposition 1 36

Abb. 14: ETC, simulierte Anfangsreflexionen erster Ordnung (S1E1) 36

Abb. 15: Reflexionswege, simulierte Anfangsreflexionen erster Ordnung (S1E1)..... 36

Abb. 16: Reflektogramm der Empfangsposition 1 für die einzelnen Oktavbänder 37

Abb. 17: ETC für die Empfangsposition 5 für einzelne Frequenzbänder..... 38

Abb. 18: Echokriterium für Sprache 40

Abb. 19: Energiekriterium nach Dietsch für die Empfangspositionen E01 und E05, jeweils über das volle Frequenzspektrum und für die einzelnen Oktavbänder 41

Abb. 20 Gegenüberstellung der empfohlenen Nachhallzeiten für besetzte und unbesetzte Kirchen bei einem Volumen von 30000 m³ 48

Abb. 21: Nachhallzeit der besetzten Kirche mit Maßnahmen 64

Abb. 22: Nachhallzeit der unbesetzten Kirche, mit Zwischendecke, ohne Vorhänge und Stellwände 65

Abb. 23: 3D-Simulationsmodell der Marienkirche mit Maßnahmen: abgehangene Decke, Deckensegel über der Bühne (orange), Stellwände (gelb), Vorhänge (grün) 65

Abb. 24: Simulationsmodell der Marienkirche (Grundriss) mit Maßnahmen: abgehangene Decke, Deckensegel über der Bühne (orange), Stellwände (gelb), Vorhänge (grün)66

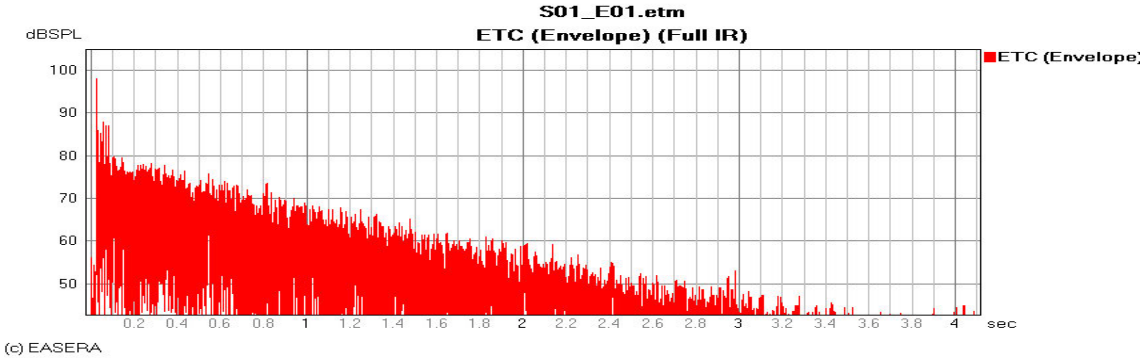
Abb. 25: Simulationsmodell der Marienkirche (Querschnitt) mit Maßnahmen: abgehangene Decke, Deckensegel über der Bühne (orange), Stellwände (gelb), Vorhänge (grün)66

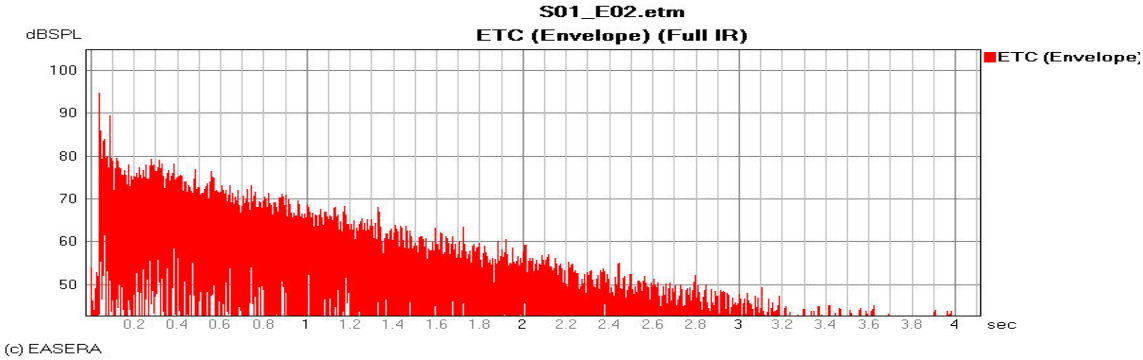
Abb. 26: Reflexion der Deckensegel für vordere (obere Grafik), mittlere (mittlere Grafik) und hintere Plätze (untere Grafik)..... 67

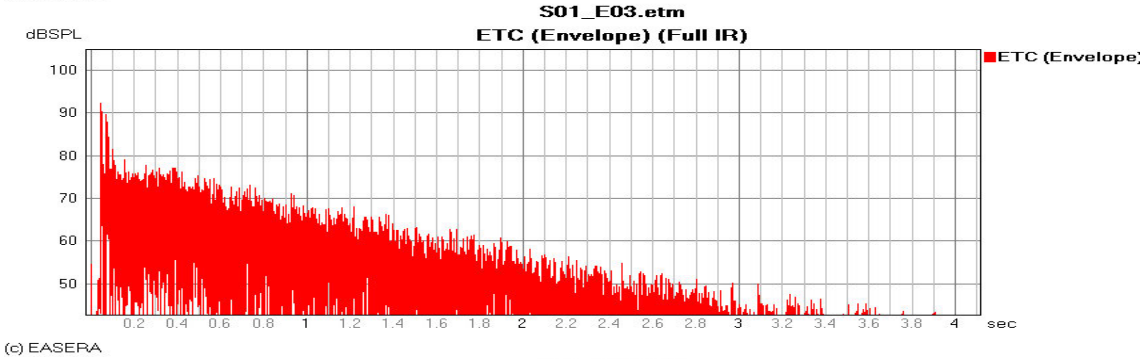
Abb. 27: Reflexionen bis zur 3.Ordnung für E5, ohne Maßnahmen 68
Abb. 28: Reflektogramm bis zur 3.Ordnung für E5, ohne Maßnahmen..... 69
Abb. 29: Reflexionen bis zur 3.Ordnung für E5, mit Maßnahmen..... 69
Abb. 30: Reflektogramm bis zur 3.Ordnung für E5, mit Maßnahmen 70
Abb. 31: gemessenes ETC für die Sendeposition 1 und Empfangsposition 1 71
Abb. 32: simuliertes ETC für S1E1 für die Kirche (ohne Maßnahmen), Raytracing bis zur 40. Ordnung..... 71
Abb. 33: simuliertes ETC für S1E1 für die Kirche mit Maßnahmen, Raytracing bis zur 40. 71

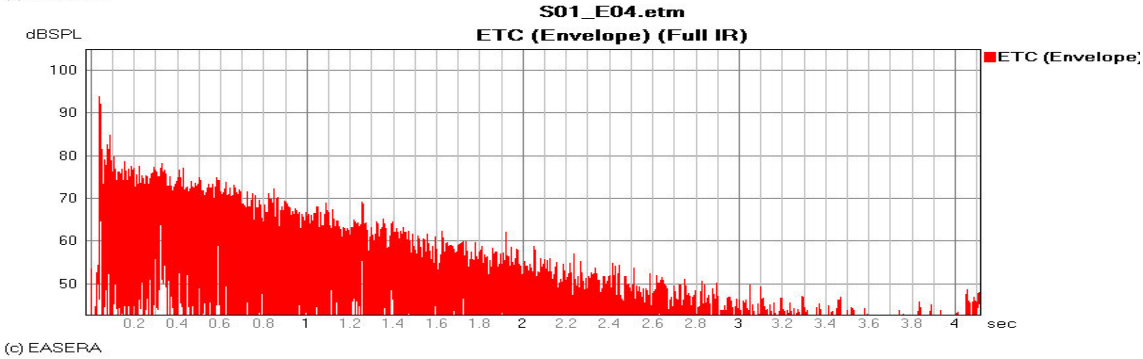
11 Anhang

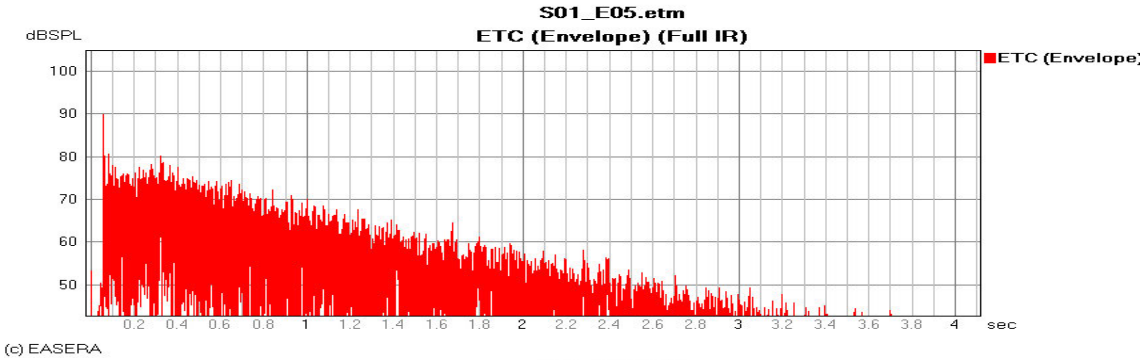
ETC für die Sendeposition 1 und die Empfangspositionen E1 bis E10

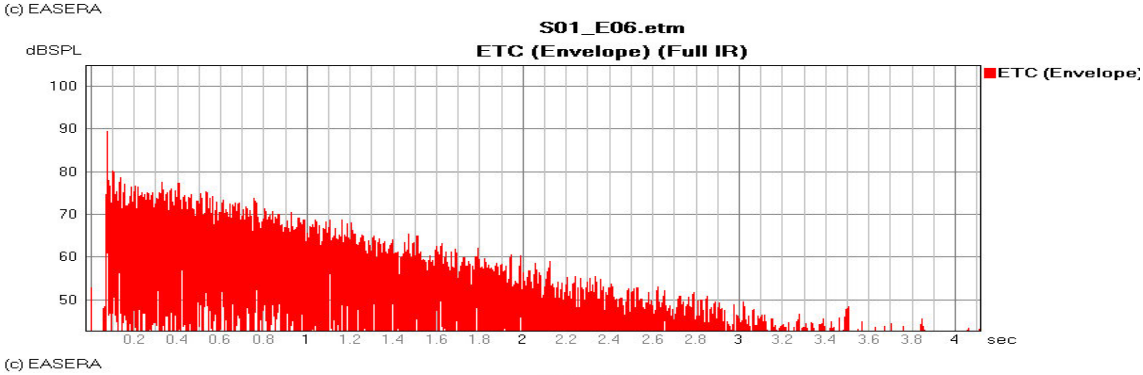


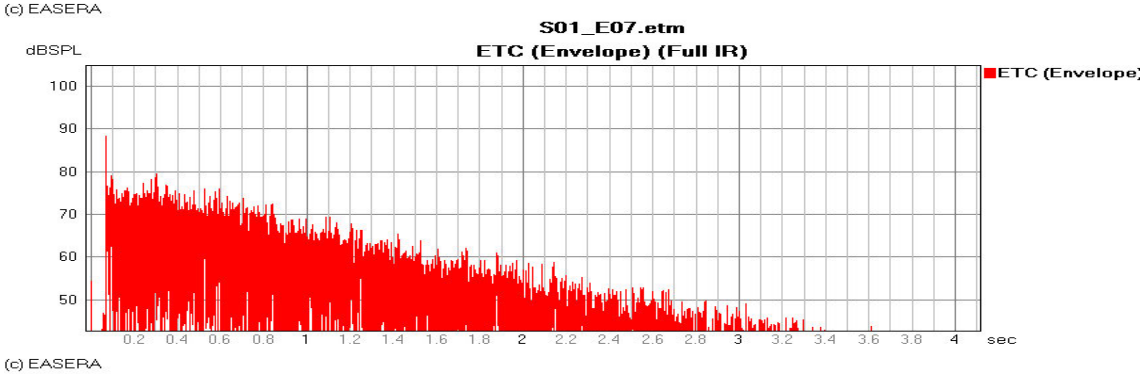


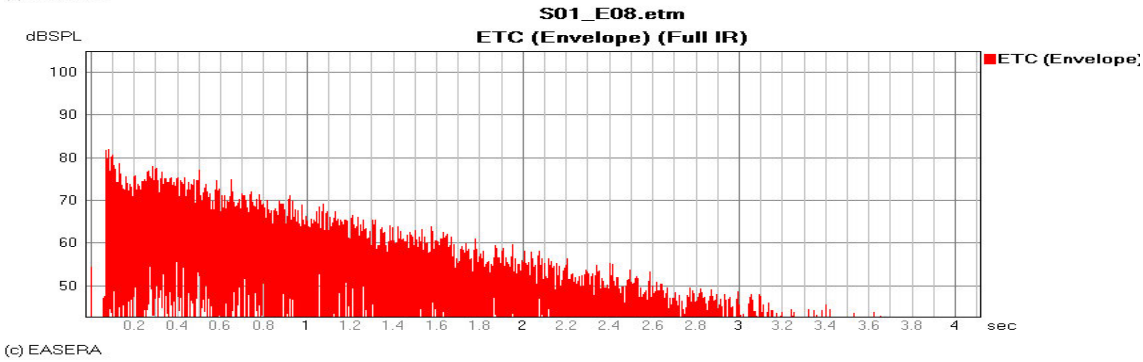


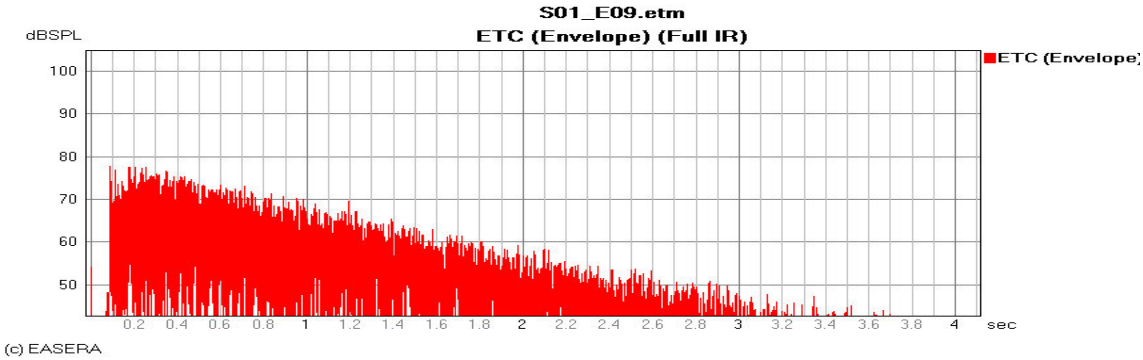


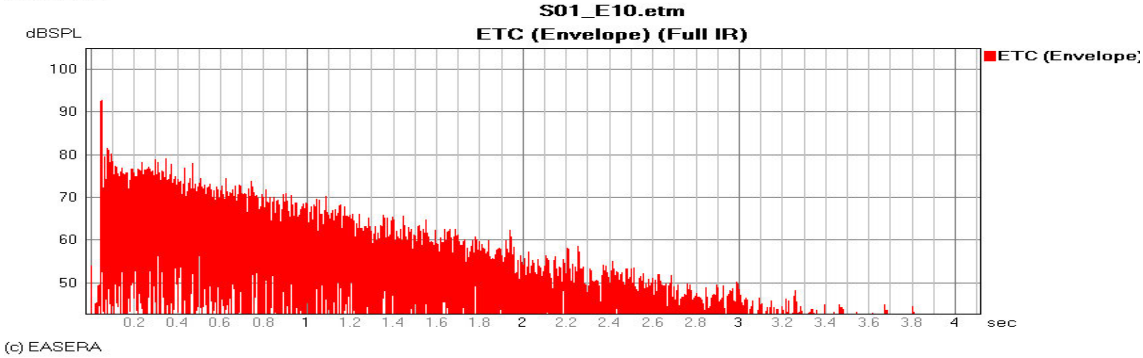

S01_E05.etm
ETC (Envelope) (Full IR)
dBSPL
ETC (Envelope)
sec
(c) EASERA


S01_E06.etm
ETC (Envelope) (Full IR)
dBSPL
ETC (Envelope)
sec
(c) EASERA


S01_E07.etm
ETC (Envelope) (Full IR)
dBSPL
ETC (Envelope)
sec
(c) EASERA


S01_E08.etm
ETC (Envelope) (Full IR)
dBSPL
ETC (Envelope)
sec
(c) EASERA


S01_E09.etm
ETC (Envelope) (Full IR)
dBSPL
100
90
80
70
60
50
0.2 0.4 0.6 0.8 1 1.2 1.4 1.6 1.8 2 2.2 2.4 2.6 2.8 3 3.2 3.4 3.6 3.8 4
sec
ETC (Envelope)
(c) EASERA

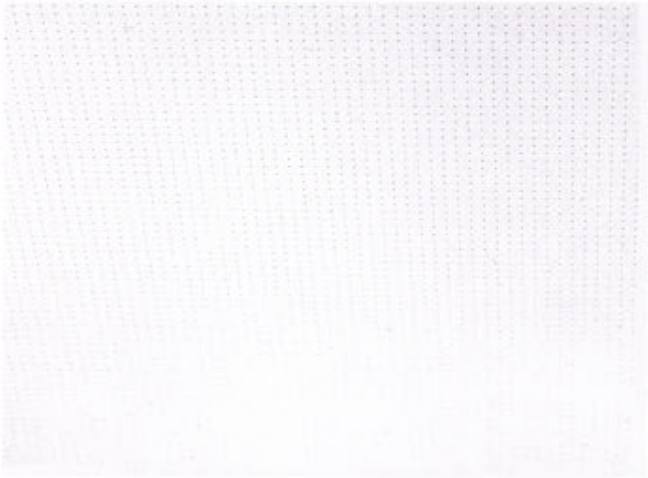

S01_E10.etm
ETC (Envelope) (Full IR)
dBSPL
100
90
80
70
60
50
0.2 0.4 0.6 0.8 1 1.2 1.4 1.6 1.8 2 2.2 2.4 2.6 2.8 3 3.2 3.4 3.6 3.8 4
sec
ETC (Envelope)
(c) EASERA

das für die Stellwände verwendete Material: OWA Dessin Typ perfora

Dessin
Typ perfora

0,45 mm Lochdurchmesser
0,64 % freier Querschnitt

α i.M. = 0,44 NRC = 0,50



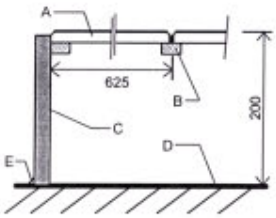
Schallabsorptionsgrad nach DIN EN 20 354 : 1993

Antragsteller: Odenwald Faserplattenwerk GmbH
63916 Amorbach

P-TA 24/1996
FhG - IBP
Bild 1

Prüfgegenstand: Unterdeckenplatten aus Metallkassetten (OWAtecta perfora)

A: Deckenplatten OWAtecta pefora
Farbe: weiß
Blechdicke: 0,5 mm, mikroperforiert
Lochdurchmesser:0,5 mm
Lochabstand: 5 mm x 5 mm
Lochflächenanteil: 0,79 %
Plattenformat: 625 mm x 625 mm
Bodenabstand bis Oberfläche: 200 mm
B: Holzlattung
C: Rahmen aus Holzspanplatten (19 mm dick)
D: Hallraumboden
E: Rahmen dauerplastisch abgedichtet



Prüffläche: 14,1 m²

Hallraum:
mit geneigten Oberflächen
und 15 Diffusoren:
10 Stück à 1,60 m x 1,25 m
5 Stück à 1,25 m x 1,25 m

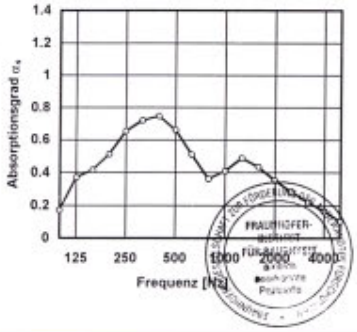
Volumen: 392 m³

Prüfbedingungen:
rel. Feuchte: 48,7 %
Temperatur: 19,8 °C

Prüfschall: Rosa Rauschen

Prüfdatum: 09.10.1996

125	250	500	1000	2000	4000
0,37	0,65	0,66	0,41	0,35	0,17



Stuttgart, den
09.Dezember 1996

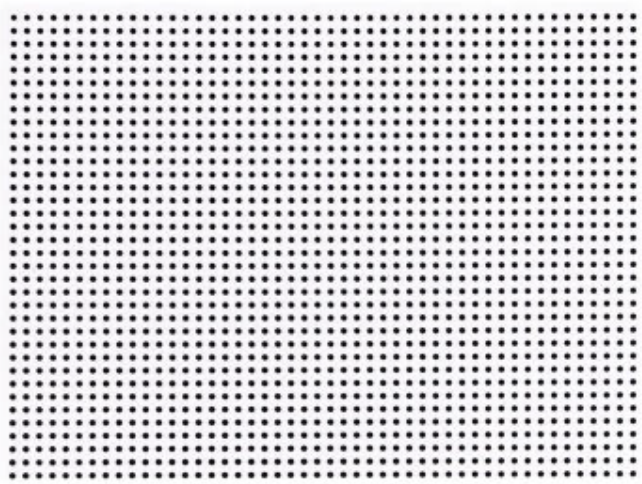
Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Institutsleiter: i.V.

α i.M. = mittlere Schallabsorption von125.....4000 Hz.

Dessin
Typ L 2516

2,5 mm Lochdurchmesser,
16% freier Querschnitt,
mit schwarzem, 0,2 mm dickem Akustikvlies

α i.M. = 0,73 NRC = 0,80



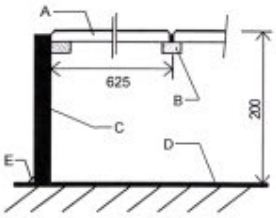
Schallabsorptionsgrad nach DIN EN 20 354 : 1993

Antragsteller: Odenwald Faserplattenwerk GmbH
63916 Amorbach

P-TA 7/1997
FhG - IBP
Bild 1

Prüfgegenstand: Unterdeckenplatten aus Metall (OWAtecta Typ L 2516)

A: Deckenplatten OWA tecta Typ L 2516
Farbe: weiß, perforiert
mit schwarzem Akustikvlies (0,2 mm)
Blechdicke: 0,5 mm, perforiert
Lochdurchmesser: 2,5 mm
Lochabstand: 5,5 mm
Lochflächenanteil: 16%
Plattenformat: 625 mm x 625 mm
Bodenabstand: 200 mm
B: Holzlattung
C: Rahmen aus Holzspanplatten (19 mm dick)
D: Hallraumboden
E: Rahmen dauerplastisch abgedichtet



Prüffläche: 14,1 m²

Hallraum:
mit geneigten Oberflächen
und 15 Diffusoren:
10 Stück à 1,60 m x 1,25 m
5 Stück à 1,25 m x 1,25 m

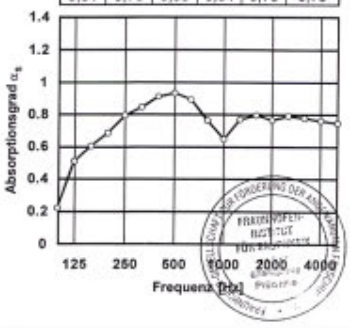
Volumen: 392 m³

Prüfbedingungen:
rel. Feuchte: 49.5 %
Temperatur: 17,6 °C

Prüfschall: Rosa Rauschen

Prüfdatum: 12.03.1997

125	250	500	1000	2000	4000
0,51	0,79	0,93	0,64	0,76	0,76



Stuttgart, den
10. April 1997

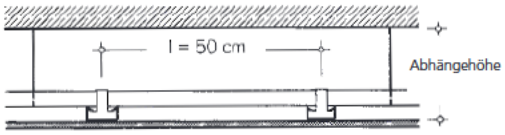
Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Institutsleiter: i.V.

NRC = mittlere Schallabsorption von 250.....2000 Hz.

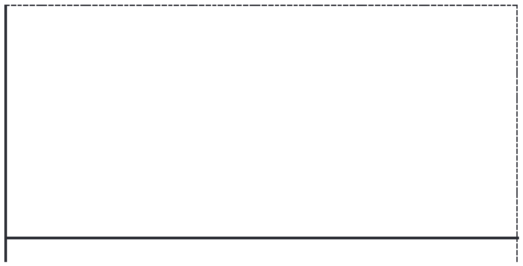
für die eingezogene Decke verwendete Material: Rigips Bauplatte RB, 12,5 mm mit Dämmstoffauflage:

4.07.10 Rigips Bauplatten RB, 12,5 mm ohne Dämmstoffauflage

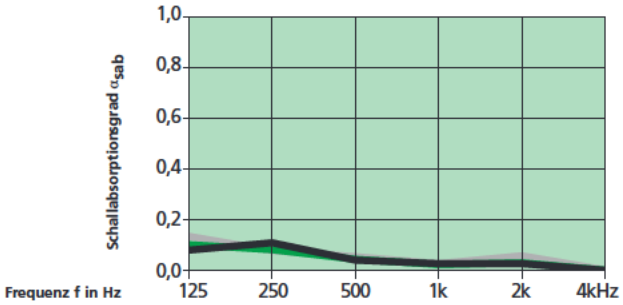
Geschlossene Oberfläche
Konstruktionsschema



Ansichtsfläche



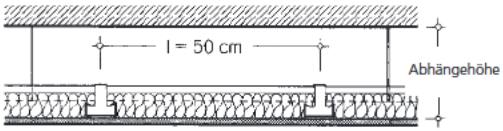
Anwendung z. B. für Akustikdecken mit Randfries bzw. für Plattenfelder mit geschlossener Oberfläche.



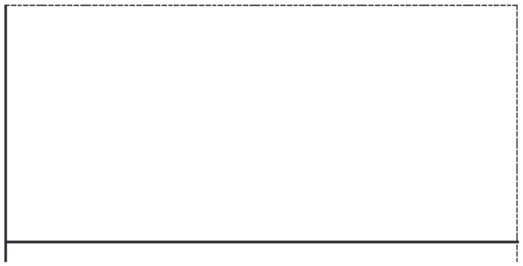
f in Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Abhängehöhe 100 mm	0,08	0,11	0,04	0,03	0,03	0,00
Abhängehöhe 200 mm	0,11	0,09	0,04	0,02	0,03	0,00
Abhängehöhe 400 mm	0,14	0,09	0,05	0,03	0,05	0,00

4.07.11 Rigips Bauplatten RB, 12,5 mm mit Dämmstoffauflage

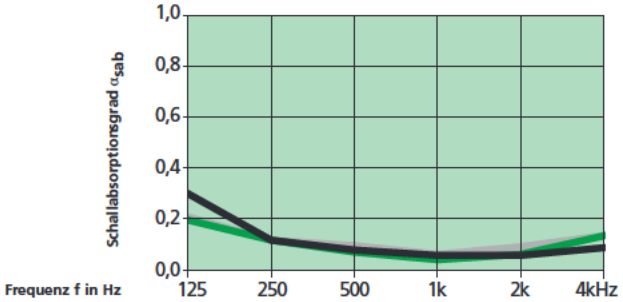
Geschlossene Oberfläche
Konstruktionsschema



Ansichtsfläche



Anwendung z. B. für Akustikdecken mit Randfries bzw. für Plattenfelder mit geschlossener Oberfläche.



Eine Mineralwolle-Auflage von 40 mm war Mitbestandteil der Konstruktion.

f in Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Abhängehöhe 100 mm	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,10
Abhängehöhe 200 mm	0,20	0,12	0,07	0,05	0,06	0,13
Abhängehöhe 400 mm	0,21	0,12	0,09	0,06	0,09	0,13

Erklärung

Die selbstständige Anfertigung versichere ich an Eides statt.

Berlin, den 13.07.07 .....

Ort, Datum

.....

Unterschrift