

Masterarbeit

Der raumakustische Planungsprozess und die akustische Optimierung von Räumen

**Ausgeführt zur Erlangung des akademischen Grades eines Diplomingenieurs
der Studienrichtung Bauingenieurwissenschaften unter der Leitung von**

Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Mag. Dr.iur. Dr. techn. Peter Kautsch

Mitbetreuer: Dipl.-Ing. Heinz Ferk

Institut für Hochbau und Bauphysik

eingereicht an der Technischen Universität Graz

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

von

Luis Salguero

Matrikelnummer: 02331137

Graz, 05.2011

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
Date

.....
(signature)

Danksagung

Kurzfassung

Diese Masterarbeit untersucht häufige Probleme der Raumakustik und empfiehlt Lösungen und Hinweise, wie man, wenn nötig, einen Raum beliebiger Form akustisch optimiert. Mit Hilfe von normierten Techniken und allgemeinem Wissen über Raumakustik kann man häufige Probleme vor oder während der Planungsphase eines Gebäudes vermeiden. In einigen Fällen werden Räume mit einer spezifischen Nutzung vorgesehen, wie zum Beispiel Hörsäle, Hallen, Diskotheken, Theater u.ä., dennoch wird die Bedeutung der raumakustischen Planung von Architekten und Bauingenieuren ignoriert oder vernachlässigt. Als Folge solcher Nachlässigkeit werden Techniker mit neuen Herausforderungen, wie man einen schlecht geplanten Raum aufbessern kann, konfrontiert. Dies kann zu erhöhten Kosten führen, welche von Anfang an vermieden werden hätten können. Mittels der Theorie zum Verhalten des Schalls in Räumen kann man bestimmen, welche Geometrie, welches Volumen, welche Grundform und welche Materialien für einen spezifischen Raum am besten geeignet sind. Der Verwendungszweck und die Funktion eines Raumes sind zwei wichtige Faktoren, die helfen, die optimale Akustik eines Raumes zu definieren. In anderen Worten: die akustische Situation einer Konzerthalle, die hauptsächlich für Musik verwendet wird, besitzt nicht dieselbe akustische Situation wie ein Hörsaal, der für sprachliche Vorträge vorgesehen ist.

Um die raumakustische Qualität eines Raumes zu bestimmen, werden allgemein drei Gütemaße verwendet: 1) Nachhallzeit T_{30} , 2) Deutlichkeitsmaß D_{50} , 3) Klarheitsmaß C_{80} . Mit Hilfe von verschiedenen Methoden, definiert nach österreichischen und deutschen Normen, ist es möglich, die Gütemaße genau zu bestimmen und daraus die akustische Situation eines Raumes präzise zu beschreiben.

Ziel dieser Masterarbeit ist es, einen brauchbaren Planungsprozess anhand von praktischen Beispielen zu definieren und damit die akustische Situation eines Raumes, egal welcher Form, zu optimieren. Der erste Schritt ist die Analyse verschiedener Räume und die Definition ihrer Gütemaße. Für diesen Zweck werden zwei spezifische Räumlichkeiten als Modelle verwendet. Der erste Raum ist ein Versammlungsraum einer lokalen christlichen Gemeinde in Graz. Der Verwendungszweck des Versammlungsraumes ist Musik und Sprache. Beim zweiten Raum handelt es sich um einen Hörsaal auf der Technischen Universität in Graz, dessen Verwendungszweck hauptsächlich das Halten von Vorlesungen (Sprache) ist. Nach der akustischen Messung dieser beiden Räume mit Hilfe entsprechender Messgeräte ist der zweite Schritt, ein 3D-Modell mit einem Software-Programm CATT- Acoustic genannt, zu simulieren. Mit diesem Programm kann man das Verhalten von Schall in einem beliebigen Raum simulieren. Um die Genauigkeit eines Modells zu überprüfen, muss man die Messwerte der Simulation mit den realen akustischen Messungen vergleichen. Besonders wichtig ist es, ein präzises Modell zu haben. Man stellt sich demnach die Frage: was brauchen wir, um die akustische Situation eines Raumes zu verbessern? Der nächste Schritt ist die Analyse spezifischer Details im Modell, d.h. Volumen, Geometrie, Materialien und zusätzliche Wand- oder Deckenverkleidungen so zu modifizieren, dass das erwünschte akustische Optimum erreicht wird. Der akustische Planungsprozess besteht aus mehreren Leitfäden, die in dieser Masterarbeit vorgestellt werden.

Abstract

This Diploma Thesis examines common Problems in the room acoustic and suggests easy solutions and references how to solve and optimized any kind of room when needed. Using standardized techniques and general knowledge about room acoustic, common acoustic Problems could be avoided before or during a construction stage of any given building room. In some cases rooms are designed for a specific use, for example: classrooms, halls, discotheques, theaters and similar; nevertheless the importance of an acoustic planning is often ignored or forgotten by architects and civil engineers. As a result of this negligence, engineers are confronted with new challenges how to improve the acoustic in a poorly designed room. This could lead to ridiculous high expenses, which could have been avoided from the beginning. By examining the theory about how sound behaves in a room one can determinate which geometry, volume, room shape and materials are adequate for a specific room. The use and purpose of a room are two of the most important factors, which help us to define, which optimal acoustical situation a specific room should have. In other words, the acoustical situation of a concert hall, which is use for music is not the same as the acoustical situation of a classroom at a University, which is use mainly for speech.

There are three specific room acoustic quality criterions which helps us to determinate the actual acoustic state of any given room: 1) (Early) Decay Time T_{nr} , 2) Clarity criterion D_{50} , 3) Sound Definition criterion C_{80} . With help of different methods, defined by the Austrian and German standard norms, is possible to concretized accurately the quality criterions and comprehend the real and actual acoustical situation of any room.

The purpose of this thesis is to define a useful Planning process in order to optimize the room acoustical situation. The first step is to analyze various rooms, and define the quality criterions. For this purpose two specific rooms are used as example. The first room is a reunion hall, for a local Christian church where the use and purpose of this room are music and speech and the second one is a classroom at the technical University in Graz used mainly for lectures (speech). After acoustically measuring these rooms with the right equipment, the second step is to create a 3D model of these specific rooms using room-acoustical software called Catt Acoustic and then simulate how sound behaves in these rooms. In order to define an accurate a 3D model one must match the simulated values with real measurements from the first step. In particular is necessary to have an accurate model. What do I need to change in this room in order to improve the acoustical Situation? The fourth step consist in modifying specific details of the model such as volume, geometry, and even construction materials. Only then is possible to achieve an improvement and even reach an optimum Situation for the desired natural acoustic. The model helps us to define which modifications are necessary to improve any room. The planning process consists in further steps which are included in this thesis.

Inhaltsverzeichnis

Masterarbeit	I
Eidesstattliche Erklärung.....	II
Statutory Declaration.....	II
Danksagung.....	III
Kurzfassung	IV
Abstract.....	V
Inhaltsverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis.....	XI
Vorwort	XII
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzungen	1
2 Fallstudie FCG Graz Versammlungsraum.....	4
2.1 Problemstellung.....	4
2.2 Die Ausgangssituation:	5
3 Messverfahren	6
3.1 Verfahren des abgeschalteten Rauschens	6
3.2 Verfahren der integrierten Impulsantwort.....	7
4 Messungen mit WinMLS	9
4.1 Messbedingungen.....	9
4.2 Messaufbau.....	9
4.2.1 Messpunkte.....	9
4.2.2 Messaufbau – Tonstudio.....	11
4.2.3 Messaufbau – Saal der freien Christengemeinde	11
4.2.4 Geräte.....	12
4.2.5 Beschreibung der Messungen.....	14
4.2.6 Ergebnisse der Messung im Tonstudio	15
4.2.7 Ergebnisse der Messungen im Versammlungssaal	16
5 Raumakustische Simulation	19
5.1 Die Raumimpulsantwort	19
5.2 Die Energiekriterien	20
5.3 Simulationen mit CATT Acoustic (Computer Aided Theatre Technique).....	22

6	Die drei Räume.....	27
6.1	Saal der FCG	27
6.1.1	Programmcode.....	27
6.1.2	<i>Ergebnisse der Simulation</i>	29
6.2	Tonstudio	33
6.2.1	Ergebnisse der Nachhallzeiten im Tonstudio.....	34
6.3	Hörsaal i2.....	38
6.3.1	Ergebnisse der Simulation im Hsl2.....	39
6.4	Zusammenfassung	40
7	Der raumakustische Planungsprozess.....	42
7.1	Ablauf der Raumakustischen Planung	43
7.1.1	Kriterien der Statischen Raumakustik:.....	43
7.1.2	Kriterien der geometrischen Raumakustik	45
8	Der praktische Ablauf des raumakustischen Planungsprozesses	50
8.1	Akustische Optimierung für den Versammlungsraumes der FCG	50
9	Optimierung der Raumakustik.....	54
9.1	Maßnahmen zur Optimierung der Raumakustik	56
9.1.1	Variante A.....	57
9.1.2	Variante B.....	62
9.1.3	Variante C.....	65
9.1.4	Überblick aller Varianten	71
9.2	Hörsaal HS I2	74
9.2.1	Simulation des Hörsaales mittels Catt Acoustic.....	76
	Literaturverzeichnis.....	79
	Anhang A.....	80
	Prüfbericht	82
	Anhang B- Pläne	83

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Versammlungsraum der FCG Schematisch dargestellt Maßstablos.....	4
Abb. 2 Schematischer Aufbau der Messung der Nachhallzeit mit Rauschen als Anregung.....	6
Abb. 3 Schematischer Aufbau der Nachhallzeitmessung bei impulshafter Anregung.....	7
Abb. 4 Abstand der Mikrofone von der Schallquelle in der Horizontalebene.....	10
Abb. 5 Mindestabstand der Mikrofone von der Schallquelle in der Vertikalebene.....	10
Abb. 6 Messaufbau im Tonstudio.....	11
Abb. 7 Mikrofon-Positionen im Saal der FCG.....	12
Abb. 8 Foto des gesamten Messaufbau im Gemeindesaal.....	12
Abb. 9 Schematische Abbildung der Apparaturen zur Messung der Nachhallzeit mit WinMLS.....	13
Abb. 10 Quadrierte Impulsantwort im Tonstudio.....	15
Abb. 11 Nachhallzeit im Tonstudio Zeit/Frequenzdiagramm(T/Hz).....	15
Abb. 12 Klarheitsmaß im Tonstudio.....	16
Abb. 13 Nachhallzeit im Saal der FCG '.....	17
Abb. 14 Klarheitsmaß im Saal der freien Christengemeinde.....	17
Abb. 15 Quadrierte Impulsantwort im Saal der freien Christengemeinde.....	18
Abb. 16 Nachhallzeit mit eingeschalteter Lüftung.....	18
Abb. 17 Kugelwellen/Lochdurchmesser kleiner als die Wellenlänge.....	19
Abb. 18 Zylinderwellen/ Schlitzbreite kleiner als die.....	19
Abb. 19 Beispiel einer Raumimpulsantwort.....	20
Abb. 20 Schematisierte Raumimpulsantwort [6]S.149.....	20
Abb. 21 Nachhallzeit T und Anfangsnachhallzeit EDT [6]S.141.....	21
Abb. 22 Ray Tracing nach Zeit 0 ms.....	23
Abb. 23 Ray Tracing nach Zeit 5 ms.....	23
Abb. 24 Abb. 8 Ray Tracing nach Zeit 10 ms.....	23
Abb. 25 Ray Tracing nach Zeit 20 ms.....	23
Abb. 26 Beispiel für eine Audience Area Map vier Gütemaße.....	23
Abb. 27 Verfahren der Maximum Length Sequence.....	24
Abb. 28 Direktschall Schallquelle / Empfänger.....	24
Abb. 29 Beispiel eines Echogramms.....	24
Abb. 30 Sound Roses. Reflexionen in sechs verschieden Eintreffzeit Intervallen.....	25
Abb. 31 Beispiel eines Vektorgramms. Die Eintreffzeit der Reflexionen ist farblich codiert.....	25
Abb. 32 Beispiel eines Nachhallzeitfrequenzganges.....	26
Abb. 33 Catt-Modell: Saal der FCG.....	27
Abb. 34 Nachhallzeit des FCG Saals in Catt.....	29
Abb. 35 gemittelte Nachhallzeit mit WinMLS und Catt des FCG Saals.....	29
Abb. 36 Deutlichkeitsgrad in [%].....	31
Abb. 37 gemittelte D_{50} in [%] der FCG.....	31
Abb. 38 Klarheitsmaß in [dB].....	32
Abb. 39 Klarheitsmaß in Catt und WinMLS.....	33
Abb. 40 Grundriss Tonstudio im Catt.....	33
Abb. 41 Tonstudio in CATT-Acoustic.....	33
Abb. 42 Nachhallzeiten im Tonstudio CATT ; Raumzustand: VZ.....	34
Abb. 43 Nachhallzeitim Tonstudio; Raumzustand: VZ WinMLS und in CATT.....	34
Abb. 44 Nachhallzeiten im Tonstudio Raumzustand: VH.....	35
Abb. 45 Nachhallzeit im Tonstudio; Raumzustand: VH WinMLS und in CATT.....	35
Abb. 46 Nachhallzeit im Tonstudio; Raumzustand: VO WinMLS und in CATT.....	36
Abb. 47 Grundriss Hörsaal i2.....	38

Abb. 48 Hörsaal i2 CATT-Acoustic/ Foto nach Sanierung 05/20011	38
Abb. 49 Nachhallzeiten Hörsaal i2 (CATT)	39
Abb. 50 Vergleich der Nachhallzeit Hörsaal i2 (WinMLS/Catt).....	39
Abb. 51 Sollwert T_{soll} der gemittelten Nachhallzeit für unterschiedliche Nutzungsarten([4]. S.14).....	44
Abb. 52 Toleranz Bereiche der empfohlene Nachhallzeit für Sprache(links) und Musik (rechts) in Abhängigkeit der Frequenz nach Din 18041[4] S.15.....	45
Abb. 53 Verwischungsschwelle für Sprache.....	46
Abb. 54 Verwischungsschwelle für Musik.....	46
Abb. 55 Direkter und indirekter Schall bei einer Sitzreihenüberhöhung[8].....	46
Abb. 56 Anordnungsbeispiele von Reflektoren in Vortragsräumen[8].....	47
Abb. 57 Maßnahmen gegen Flatterechoerscheinungen[6], S.159.....	47
Abb. 58 Deckenreflexionen im Längsschnitt bei ebener Decke.....	47
Abb. 59 Deckenreflexionen im Längsschnitt nach Optimierung der Deckenform.....	47
Abb. 60 Verlängerung (links) und Verkürzung(rechts) der Nachhallzeit durch schräge Wandflächen([6] S.169).....	48
Abb. 61Fokussierung der ersten Reflexionen im Kreisraum.....	49
Abb. 62 Seitenwandreflexionen obere Saalfläche Rückwandreflexionen	51
Abb. 63 Berechnung der Nachhallzeit nach Sabine [13]	52
Abb. 64 Berechnung der Nachhallzeit nach Sabine in Abhängigkeit des Raumvolumens [13].....	54
Abb. 65 Schallabsorptionsgrad der Deckenplatte.....	55
Abb. 66 Absorptionsgrad der Glaswolle in H]	55
Abb. 67 Resonanzfrequenz von Plattenschwingern in Abhängigkeit von Wandabstand. [6]S.83	56
Abb. 68 Variante A.....	57
Abb. 69 Reflexionslenkung mit Hilfe von Reflektoren nach Reflexionsgesetz.....	58
Abb. 70 Mindestgröße von Flächen und spiegelnde Reflexionen.....	59
Abb. 71 Simulationsmodell der Variante A	60
Abb. 72 Aktuelle Nachhallzeit.....	61
Abb. 73 Nachhallzeit Variante A.....	61
Abb. 74 Gütemaße farbcodiert auf Publikumsebene.....	61
Abb. 75 Variante B.....	62
Abb. 76 Erste SchallReflexionen bei geneigte Decke / Variante B	63
Abb. 77 Simulation der Variante B.....	63
Abb. 78 aktuelle Nachhallzeit	63
Abb. 79 Nachhallzeit Variante B.....	63
Abb. 80 Gütemaße farbcodiert auf Publikumsebene.....	64
Abb. 81 Nachhallzeit mit Harmony-Platte [9].....	65
Abb. 82 Erhöhung der Nachhallzeit durch das Umtauschen der Deckenplatten[9].....	66
Abb. 83 Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Porosität.[6] S.124.....	66
Abb. 84 Reflexionen bei ebener Decke.....	67
Abb. 85 Resonanzabsorber auf den Rückwand unten[6]s.83	67
Abb. 86 Variante C ohne Absorber.....	68
Abb. 87 Aktuelle Nachhallzeit.....	68
Abb. 88 Nachhallzeit Variante C.....	68
Abb. 89 Variante C mit Absorbern	69
Abb. 90 aktuelle Nachhallzeit	69
Abb. 91 Nachhallzeit Variante C mit Absorber.....	69
Abb. 92 Gütemaße farbcodiert auf Publikumsebene.....	69
Abb. 93 Nachhallzeit der akustische Messung und Simulationen alle Varianten	71
Abb. 94 Störende Reflexionen an der Rückwand	74

<i>Abb. 95 Die Sitzreihenüberhöhung im HSi2</i>	<i>75</i>
<i>Abb. 96 Die Decke als Plattenabsorber Variante 1[10]S.188.....</i>	<i>75</i>
<i>Abb. 97 Die Hsi2-Decke als Schlitzabsorber Variante 2 [10] S.189</i>	<i>76</i>
<i>Abb. 98 HSi2 vor Simulation vor der Sanierung</i>	<i>76</i>
<i>Abb. 99 Simulation des Hörsaales vor der Sanierung</i>	<i>77</i>
<i>Abb. 100 D₅₀ Vor der Sanierung</i>	<i>77</i>
<i>Abb. 101 D₅₀ nach der Sanierung</i>	<i>77</i>
<i>Abb. 102 Gemessene Nachhallzeiten nach den Sanierungsarbeiten</i>	<i>78</i>

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.Ort.....	9
Tab. 2 Zeit der Messung.....	9
Tab. 3 Temp. und rel.Luftfeuchtigkeit.....	9
Tab. 4 Mikrofon Positionen und Farbe der Kurven.....	16
Tab. 5 Schallabsorptionsgrade verschiedener Materialien [6]s.148.....	28
Tab. 6 Nachhallzeit in WinMLS und in Catt.....	30
Tab. 7 Deutlichkeitsgrad-maß.....	30
Tab. 8 Klarheitsmaß Beurteilung Kriterien.....	32
Tab. 9 Nachhallzeiten im Tonstudio.....	37
Tab. 10 Deutlichkeitsmaß $D_{50}[\%]$ im Tonstudio.....	37
Tab. 11 Klarheitsmaß $C_{80}[\text{dB}]$ im Tonstudio.....	37
Tab. 12 Nachhallzeit in HS i2.....	40
Tab. 13 Gütemaße in Hs I2.....	40
Tab. 14 Volumenkenzahl als Funktion der Nutzungsart nach [DIN18041,S.12].....	44
Tab. 15 Reflektoren Variante A.....	60
Tab. 16 Nachhallzeit und Gütemaße der Variante A.....	61
Tab. 17 Nachhallzeit und Gütemaße der Variante B.....	64
Tab. 18 Nachhallzeit und Gütemaße Var.C ohne Absorber.....	68
Tab. 19 Nachhallzeit und Gütemaße Var.C mit Absorber.....	70
Tab. 20 Ergebnisse der akustischen Messungen mittel WinMLS und Simulationen mittels Catt Acoustic.....	72
Tab. 21 Kriterien zur Beurteilung der Varianten.....	73
Tab. 22 Nachhallzeiten in HSI2.....	77

Vorwort

„Das Reich des Hörens ist Phantastisch.“

, Ein Raum ist zu gestalten. Ein Raum wird erhört. Ein Raum bekommt seinen Klang.“¹

Raumakustik ist mehr als ein wichtiges Teilgebiet der Akustik, das Techniker rund um die Welt beschäftigt. Die Raumakustik ist ein Werkzeug, um Schönheit in das Reich des Hörens zu bringen. Unsere Sprache und unser Verhalten in der Gesellschaft sind von visuellen Elementen stark geprägt. Gleichzeitig wird die Bedeutung des Hörens oft unterschätzt. Ohne Hören gibt es jedoch keine Kommunikation, wie wir sie für selbstverständlich halten, keine Lernfähigkeit, keine Persönlichkeitsentwicklung. Gutes Hören verschafft Lebensfreude und Lebensqualität. Hören vermittelt Empfindungen und Gefühle:

„Das Auge ist der Spiegel der Seele,

aber das Ohr ist das Tor zur Seele“²

¹ (MiloEevic & Ciric, 1999) Rudolf Schrickler, Kreative Raum-Akustik, 2001

² indisches Sprichwort (zitiert in Berendt 1993, S. 288)

1 Einleitung

Im Bauwesen und speziell in der Bauphysik spielt die Behaglichkeit eine große Rolle. Der Sinn des Bauens liegt darin, ein behagliches Raumklima sowie ein angenehmes Umfeld für die Menschen (bzw. andere Lebewesen) zu schaffen.

Behaglichkeit ist subjektiv: Physiologische und psychologische Einflüsse spielen eine Rolle. Man kann keine präzise Umgebung beschreiben, die mehrheitlich als behaglich empfunden wird. Es kommt immer auf das Individuum an. Was der Mensch als „angenehmes Umfeld“ empfindet, kann auch von bauphysikalischen Faktoren abhängig sein, wie z.B.: Temperatur, Luftfeuchtigkeit usw.

Diese Verhältnisse müssen auf die menschlichen Bedürfnisse, die sich dabei in erster Linie nach der Tätigkeit richten, die der Mensch in dem betreffenden Gebäude ausführt, abgestimmt werden.

Die akustische Behaglichkeit ist in dieser Arbeit als wichtiges Thema erwähnt. Obwohl diese sich schwer erfassen lässt, kann man akustische Unbehaglichkeit in einigen Fällen ziemlich genau definieren. Die Wahrnehmung von Lärm wird in jedem Menschen unterschiedlich spürbar und als akustisch unbehaglich empfunden. Was ein Mensch beispielsweise als Musik empfindet, kann für jemand anderen Lärm darstellen.

1.1 Zielsetzungen

In der Conrad von Hötzendorfstraße 64 /8010 Graz befindet sich das Gebäude der FCG-Graz (Freie Christen-Gemeinde). Es handelt sich um ein vierstöckiges Hochhaus mit einem Versammlungsraum für 100 bis 130 Personen. Es ist zu erwarten, dass der zur Verfügung stehende Platz bald nicht mehr ausreicht, wodurch ein Zubau notwendig wird. Der Versammlungsraum der FCG dient in dieser Arbeit als Beispiel für die Untersuchung der Raumakustik und des raumakustischen Planungsprozesses. Anhand dieses praktischen Beispiels werden folgende Ziele verfolgt:

Raumakustische Untersuchung eines in Graz befindlichen Gebäudes der Freien Christen-Gemeinde Graz (FCG Graz) und Erstellung eines Modells mittels eines CAD-Systems für den entstehenden Versammlungsraum.

Als Unterlagen werden die Originalpläne des Grundstücks sowie die Pläne des bereits bestehenden Gebäudes verwendet, die zur Verfügung stehen, um die Bedingungen zu definieren. Nach einer genaueren Analyse aller Bedingungen kann man sinnvolle Varianten erstellen.

Die akustische Untersuchung des entstehenden Versammlungsraumes erfolgt mittels Modellierung eines CAD-Systems, welche die innere Gestalt des Raumes definieren soll. Damit die Akustik dieses Raumes optimiert werden kann, wird durch die schrittweise Modifizierung des Modells ein interaktiver akustischer Vorgang eingeleitet bis ein akustisches Optimum erreicht wird. Der virtuelle Entwurfsraum wird als Softwarelösung realisiert und koppelt Module zur dreidimensionalen

Modellierung, Simulation und Visualisierung. Catt Acoustic³. wird zur Modellierung eingesetzt.

1. Den raumakustischen Planungsprozess in einfachen Schritten darstellen:

Dieses Kapitel führt die raumakustische Planung in der Praxis ein. Die relevanten Zusammenhänge, ausgehend von den Grundlagen der Raumakustik und den raumakustischen Normen, insbesondere ÖNorm EN ISO 3382.⁴, werden dargestellt. Als Fallbeispiel wird die raumakustische Sanierung des Versammlungsraumes der FCG mit Hilfe von einfachen Leitfäden für den raumakustischen Planungsprozess angeführt.

2. Einfache Maßnahmen, um eine erfolgreiche raumakustische Planung zu erreichen, vorschlagen:

Hier werden Maßnahmen vorgeschlagen, um eine sinnvolle raumakustische Sanierung für den Versammlungsraum der FCG zu erreichen. Die Pläne des Zu- und Umbaus für den Versammlungsraum werden mit *Autocad* gezeichnet. Die Varianten werden mit der FCG-Graz im Vorfeld besprochen. Eine endgültige Entscheidung soll getroffen werden, wenn geklärt ist, welche Variante für die Bedürfnisse der Gemeinde die beste ist.

3. Die geometrischen Gesetze der Schallausbreitung, um raumakustische Probleme zu vermeiden, in der Praxis richtig einsetzen:

Für die akustische Untersuchung des Versammlungsraumes werden allgemeine geometrische Prinzipien eingesetzt. Die einfache geradlinige Ausbreitung einer Welle kann eine Störung erfahren, sobald irgendein Hindernis oder eine Änderung im Medium auftritt. Hier spielen Reflexionengesetze und Absorptionsflächen eine wichtige Rolle. Werden diese einfachen geometrischen Gesetze ignoriert oder vernachlässigt, so können unerwünschte negative akustische Zustände wie z.B. Echos, unerwünschte Nachhallzeiten etc. verursacht werden. In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl von Verordnungen in die allgemein anerkannten Regeln der Technik aufgenommen und klare Forderungen an die akustische Konditionierung von Räumen in verschiedenen Nutzungen definiert.

4. Architekten und Bauingenieuren anhand von Beispielen die Raumakustik näher zu bringen und ihr Interesse daran zu wecken:

Ziel dieser Arbeit ist auch anhand von verschiedenen Beispielen, bei Architekten und Bauingenieuren ein gewisses Gefühl und Interesse an der Raumakustik zu wecken. Letztendlich sind es die Architekten und Bauingenieure, die für die Schaffung einer angenehmen Umgebung innerhalb eines Raumes verantwortlich sind. Das Thema Raumakustik wird in der modernen Architektur noch vielfach vernachlässigt oder ignoriert. Jeden Tag werden weltweit neue Konzerthallen, Auditorien, Hörsäle, Bürogebäude und andere Bauwerke gebaut, in denen Raumakustik eine wichtige Rolle spielt, dennoch werden wichtige Aspekte der Akustik in der Vorplanungsphase nicht berücksichtigt, die zu einem akustischen Mangel führen. Oftmals sehen sich

³ Catt Acoustic- Software Programm für Raumakustik Prognose und Auralisation

⁴ ÖNorm EN ISO 3382 Akustik-Messungen von Parametern der Raumakustik Teil 1 und 2

Techniker und Architekten mit dieser Problematik konfrontiert. Auch in Bürogebäuden ist das Thema Raumakustik nicht zu ignorieren. Raumakustik von Arbeitsplätzen ist zentral für das Wohlbefinden der Angestellten und die Qualität der Arbeitsumgebung. Mit dieser Masterarbeit wende ich mich vor allem an Architekten und Bauingenieure, die mit akustischen Aufgabenstellungen befasst sind, aber auch an Interessenten, die, aus welchen Gründen auch immer, mehr über das Thema wissen wollen.

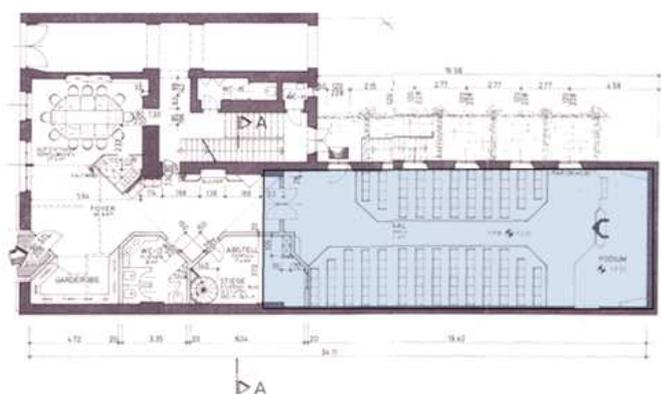
2 Fallstudie FCG Graz Versammlungsraum

Der Versammlungsraum der Freien Christengemeinde (FCG) befindet sich in Graz. Dem Vorstand ist die optimale Akustik dieses Saales ein großes Anliegen. Ein großes Problem, das den Vorstand schon lange beschäftigt, ist die Verbesserung der Akustik des Saales. Im Jahre 2010 wurde, ohne zuvor akustische Messungen durchgeführt zu haben, von einer Innenausbau- und Sanierungsfirma für die Verbesserung der Akustik des Versammlungsraumes ein Kostenvoranschlag vorgelegt, der zusätzlich noch sehr kostenintensiv war.

Diese Arbeit versucht anhand von akustischen Messungen, Simulationen und einem detaillierten Planungsprozess eine sinnvolle und kostengünstigere Lösung zur Optimierung der Akustik dieses Saales zu finden.

Der Versammlungsraum der FCG

Der Versammlungsraum wird für musikalische Messen genutzt. Er findet sowohl für Sprache, als auch für Musik Verwendung. Der Raum ist für 130 Personen mit Polsterstühlen bestuhlt. Die Wände sind glatt verputzt, die aufgehängte Decke ist mit Mineralwolleplatte verkleidet und über ihr befindet sich ein 3 m hoher Luftraum. Der Versammlungsraum der FCG besitzt in seiner Geometrie eine rechteckige Grundrissfläche⁵. Er weist eine Fensterseite mit fünf Doppelflügel Fenstern auf, mit den Abmessungen 120x240 cm. Der Fußboden besteht aus Linoleum. Der Podestbereich an der Vorderseite ist trapezförmig gestaltet und hebt sich mit zwei Stufen vom Zuhörerbereich ab. Die Deckenhöhe beträgt 4,40 m.



Versammlungsraum

$h = 4,40 \text{ m}$

$b = 7,40 \text{ m}$

$L = 18,87 \text{ m}$

Raumfläche

$A = 133,23 \text{ m}^2$

Raumvolumen

$V = 550,85 \text{ m}^3$

Abb. 1 Versammlungsraum der FCG Schematisch dargestellt Maßstablos

2.1 Problemstellung

In der Raumakustik spielt der Verwendungszweck eines Raumes eine große Rolle. Darum ist es von Vorteil, wenn eine detaillierte Beschreibung des zu untersuchenden Raumes gegeben wird. Der Verwendungszweck (z.B. für klassische Musik, Vorträge, Theater, Pop-Konzert) ist maßgebend für die Gestaltung eines Raumes. Obwohl der Versammlungsraum in seiner Geometrie keiner großen

⁵ Eine rechteckige Geometrie in der Primärstruktur stellt eine ähnliche raumakustische Situation wie die Akustik eines Schuhkartons dar.

Ordnung entspricht, lässt sich die akustische Situation schwer definieren. Für die Musiker, die sich normalerweise im Bereich des Podiums befinden, ist die Akustik oder die Wahrnehmung des Schalls ganz anders als die des Publikums. Die vorderen Plätze im Publikumsbereich sind sicher besser als die hinteren. Wenn man ganz hinten sitzt, kann man leicht erkennen, dass die Akustik im Raum nicht optimal ist. Man hat das Gefühl, dass die verschiedenen Instrumente eine unterschiedliche Lautstärke haben, obwohl alle Musikinstrumente im Mischpult ziemlich gleich laut eingestellt sind. Auch ohne Berechnungen durchzuführen, lässt sich feststellen, dass dieser Raum nicht für Konzerte geeignet ist. Gleichzeitig ist die Akustik während einer Predigt oder eines Vortrages - egal wo man sitzt - sehr gut.

2.2 Die Ausgangssituation:

Vor der Planungsphase der Sanierung eines beliebigen Raumes ist es notwendig die Ausgangssituation zu definieren. Eine der wichtigsten Gütemaße ist die Nachhallzeit. Andere Gütemaße wie das Klarheitsmaß und das Deutlichkeitsmaß tragen zu einer vollständigen Definition der akustischen Situation eines Raumes bei. Diese sogenannten Gütemaße werden in den folgenden Unterkapiteln näher erklärt.

Verschiedene Methoden für die Nachhallzeitbestimmung sowie graphische, rechnerische oder computerunterstützte Methoden stehen zu Verfügung. Für die Bestimmung der Nachhallzeit wurden akustische Messungen mit Hilfe des Software Programmes *WinMLS 2004* durchgeführt. Dieses Programm arbeitet nach dem Verfahren der *Maximum Length Sequence (MLS)*. Die Messungen der Nachhallzeit und Gütemaße werden in Kapitel 4 detailliert beschrieben.

3 Messverfahren

Die Messung der Raumimpulsantwort ist die Grundlage der raumakustischen Messtechnik. Aus ihr können die raumakustischen Gütemaße sowie die Nachhallzeit eines beliebigen Raumes bestimmt werden. Der Unterschied zwischen den verschiedenen Verfahren liegt in der Art, wie die Impulsantwort gemessen wird. Durch verschiedene Erregersignale ergeben sich große Unterschiede im Bezug auf Messgenauigkeit, Signal-Störabstand und Energiegehalt. Ein diffuses Schallfeld ist die Voraussetzung für eine statistische Raumakustik. Die Erregersignale mit höherer Energie, welche auch in großen Räumen eine gleich verteilte Energiedichte hervorrufen, sind notwendig, um solche Diffusitäten zu erzeugen. Auch ein bestimmter Mindestschalldruck ist nötig, um je nach Messverfahren den benötigten Signal-Stör-Abstand sicher zu stellen.

Die Nachhallzeit in Räumen, in denen Sprache und Musik der Hauptverwendungszweck sind, wird hauptsächlich in Oktav-Frequenzbändern von 63 Hz bis 4 kHz gemessen. Für den Fall, dass die Räumlichkeiten für andere Zwecke ausgelegt sind, kann diese in Terz-Frequenzbändern von 100 Hz bis 5 kHz gemessen werden. Für die Messung der Nachhallzeit im Tonstudio und im Versammlungsraum wurden die zwei folgenden Verfahren verwendet: Das *Verfahren des abgeschalteten Rauschens* und das *Verfahren der Impulsschallmessung*. [10]

3.1 Verfahren des abgeschalteten Rauschens

Eine Anregung höherer Energie innerhalb eines Raumes ist mit Rauschen möglich. Rauschen ist ein Signal, bei dem alle Frequenzen statistisch gleichmäßig verteilt auftreten. Wird ein Raum mit solch einem Rauschen angeregt, so sind die Amplitude und die Phasenlage rein zufällig und nicht mehr reproduzierbar. Statistische Schwankungen, die nicht vom Raum abhängig sind, werden durch sehr viele Messungen ausgeglichen. Die Schallquelle sollte von allen Seiten so gleichmäßig wie möglich abgestrahlt werden. Die Anregungsdauer innerhalb eines Raumes muss so lange erfolgen, bis das Schallfeld den stationären Zustand erreicht hat, jedoch bevor der Abklingvorgang beginnt. Aus diesem Grund ist es notwendig das Signal mindestens $T/2$ lang abzusenden. Bei Räumen mit umfangreichem Volumen muss die Anregungsdauer mindestens eine Sekunde betragen.

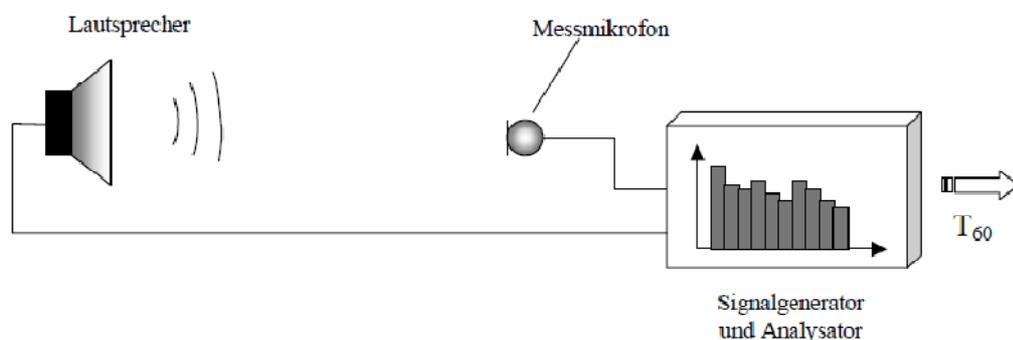


Abb. 2 Schematischer Aufbau der Messung der Nachhallzeit mit Rauschen als Anregung

Anzahl der Messungen

Da das Anregungssignal eine Zufallseigenschaft aufweist, ist es notwendig, mindestens drei Messungen an jedem Messpunkt durchzuführen. Nur so kann man eine ausreichende Wiederholbarkeit erreichen. Die Anzahl der Mikrofonstellungen hängt von der erforderlichen Messpunktdichte ab.

3.2 Verfahren der integrierten Impulsantwort

Impulsschallmessung

Die Impulsantwort von einer Quellen- zu einer Empfänger-Position ist eine Größe, die mittels der Impulsschall-Verfahren gemessen werden kann. Auch durch Pistolenknallen, Funkenstrecken, Rausch-Impulse, Zerplatzen eines Luftballons usw. kann man den Impuls erzeugen. Die Impulsantwort lässt sich direkt messen, wenn eine Impuls-Schallquelle wie z.B. ein Pistolenknall, selbst nicht als nachhallende Quelle benutzt wird.

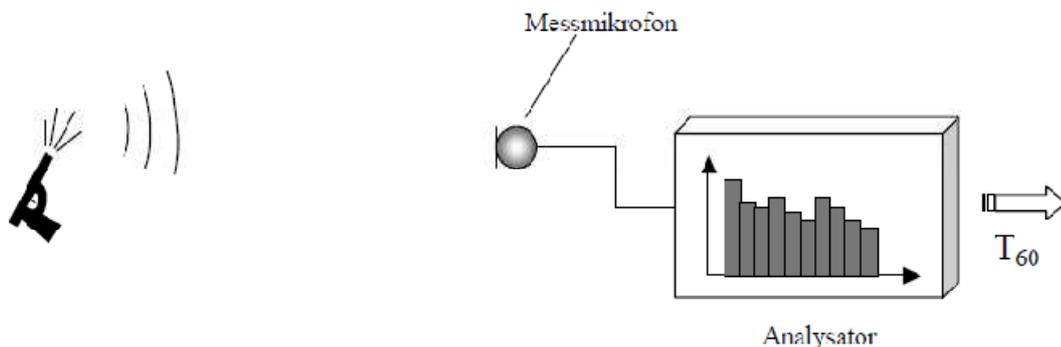


Abb. 3 Schematischer Aufbau der Nachhallzeitmessung bei impulshafter Anregung

Ist T_{30} zu messen, so ist es erforderlich, dass die Impulsschallquelle einen Spitzen-Schalldruckpegel erzeugt, der am Beginn der Abklingkurve mindestens 45 dB über dem Störpegel im jeweiligen Frequenzband liegt. Diese Anforderung kann vor allem bei größeren Räumen nicht mehr erfüllt werden. Für die Bestimmung von T_{20} reicht es einen Pegel zu erzeugen, der wenigstens 35 dB über dem Störpegel liegt.

Der Vorteil des Impulses gegenüber dem Verfahren des abgeschalteten Rauschens ist, dass keine anregungsbedingten Schwankungen vorhanden sind. Der Impuls besitzt eine genau definierte Amplituden- und Phasenlage. Die Nachhallzeit ergibt sich aus Auswertungen in Oktav- bzw. Terzbändern, als Funktion der Frequenz. Ein zweiter Vorteil der einfachen Impulserzeugung ist der geringe Messaufwand.

Die meist benutzte Modifikation der Integrierten Impulsantwort Methode ist die sogenannte *MLS (Maximum Length Sequence)*⁶. Diese Modifikation benutzt ein MLS Anregungssignal anstelle des Impulssignales. Dabei wird ein periodisches binäres Pseudozufallssignal generiert. Dieses wird in den zu messenden Raum eingespielt und über ein Kugelmikrofon wieder aufgenommen. Anschließend wird ein Vergleich zwischen der MLS und dem aufgezeichneten Signal durchgeführt. Man erhält die periodische Impulsantwort des Raumes. Aus dieser gefundenen Raumimpulsantwort

⁶ MLS: Folge maximaler Länge oder Maximalfolge

werden automatisch die Nachhallzeit und weitere Gütemaße mit Hilfe von *WinMLS* berechnet. [11] Im Gegensatz zu kurzen Impulsen hat eine Folge maximaler Länge eine längere Dauer und bei gleicher Leistung eine höhere Gesamtenergie, wodurch bei Messungen der Signal-Rausch-Abstand größer wird.[11]

4 Messungen mit WinMLS

Für die Messungen mit *WinMLS* werden zwei Räume verwendet. Die Messwerte werden mit Hilfe der MLS-Messtechnik, der Impulsantwort und den wichtigsten raumakustischen Gütemaßen in verschiedenen Räumen ermittelt und mit den Messergebnissen anderer Methoden verglichen.

Die erste von dem Forschenden durchgeführte Messung erfolgte im Tonstudio⁷ der TU Graz, die zweite im Versammlungsraum der Freien Christengemeinde Graz (FCG). Folgenden Messungen wurden nach ÖNORM EN ISO 3382 berechnet.[1]⁸

4.1 Messbedingungen

Vor den ersten Messungen müssen die Messbedingungen definiert werden. Folgende zwei Räume wurden verglichen:

Raum	Adresse
Tonstudio des IBK der TUGRAZ	Inffeldgasse 12 8010 Graz
Versammlungsraum der FCG	C. v. Hötzendorfstraße 64 8010 Graz

Tab. 1.Ort

Raum	Datum	Zeit
Tonstudio	3. November 2010	13.30 - 14.00
Versammlungsraum der FCG	3. November 2010	14.30 - 16.00

Tab. 2 Zeit der Messung

Raum	Temperatur	relative Luftfeuchte
Tonstudio	23.1° C	50,3%.
Versammlungsraum der FCG	22° C	50,0%

Tab. 3 Temp. und rel.Luftfeuchtigkeit

4.2 Messaufbau

4.2.1 Messpunkte

Die Mikrofone, wie in *Abb. 4* dargestellt, sollten mindestens eine halbe Wellenlänge voneinander entfernt sein, d.h. im üblichen Frequenzbereich sollte ein gegenseitiger Minimalabstand von 2 m gehalten werden. Der Minimalabstand beträgt in diesem Fall 1,5 m. Der Abstand jedes Mikrofones von der nächst gelegenen reflektierenden

⁷ Aufnahme Raum in Inffeldgasse 12, 1.KG 8010 Graz

⁸ ÖNORM EN ISO 3382 Akustik, Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Hinweis auf andere akustische Parameter

Oberfläche⁹ sollte mindestens eine Viertel-Wellenlängen betragen, d.h. einen Abstand von 1 m.

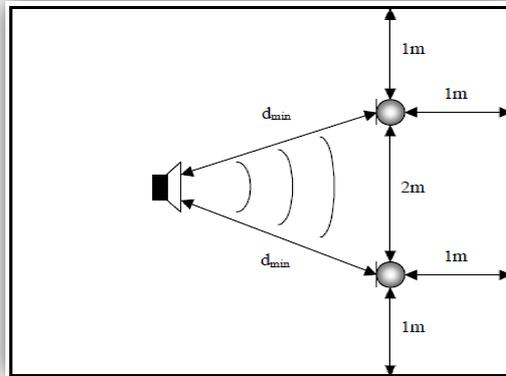


Abb. 4 Abstand der Mikrofone von der Schallquelle in der Horizontalebene

In Räumen für Sprach- und Musikdarbietungen sowie im Tonstudio der TUGraz und dem Versammlungsraum der FCG hat die Höhe der Mikrofone 1,2 m über dem Fußboden zu betragen, weil dieser Abstand die Höhe des Ohrs durchschnittlicher Zuhörer auf typischen Sitzen entspricht.

Um starken Direktschall-Einfluss zu vermeiden, sollte kein Mikrofon zu nahe an einer Schallquellen-Stellung liegen. Der Minimalabstand d_{min} kann aus dem Volumen V und einem Schätzwert der Nachhallzeit T berechnet werden:

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}} \quad \text{Glg. 1}$$

c ... Schallgeschwindigkeit [m/s]

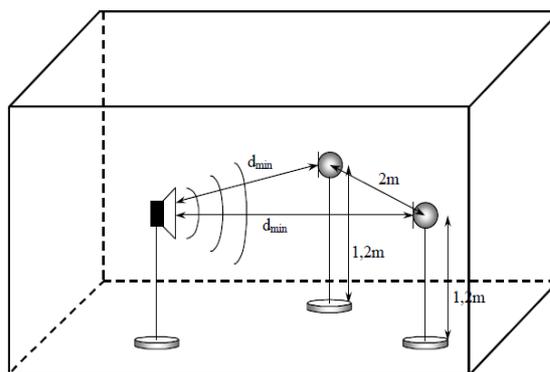


Abb. 5 Mindestabstand der Mikrofone von der Schallquelle in der Vertikalebene

In Räumen mit kleinem Volumen sind diese Anforderungen oft nicht erfüllbar. In solchen Fällen wird zur Bestimmung der Nachhallzeit T empfohlen, den Direktschall mit einem Schallschirm zwischen Empfänger und Schallquelle aufzustellen. Werden

⁹ Außer Fußboden

Messungen zur Überprüfung der akustischen Situation in einem Raum gegenüber dem Planungsvorgaben durchgeführt, bedient man sich einer gewissen Anzahl von Messpunkten.¹⁰ Die Schallquellen-Positionen und ihre Anzahl sind so zu wählen, dass alle Flächen¹¹ erfasst werden, besonders die Hauptbühne. Da sich unterschiedliche Nachhallzeiten im Raum ergeben können, muss die Verteilung der Mikrofonstellungen diese wesentlichen Einflüsse berücksichtigen. Die Unterschiede für Sitzzonen nahe den Wänden, unter Rängen oder in angekoppelten Räumen sind Beispiele dafür. Werden Messungen zur Bestimmung der Raumabsorption oder der Nachhallzeit für die Auslegung von Beschallungsanlagen oder für einen kleinen Raum (so wie im Tonstudio) durchgeführt, so bedient man sich einer kleinen Messpunktdichte. Diesem entspricht auch der geringe Messaufwand. Weiters ist der Mittelwert von drei oder mehreren Mikrofonpositionen in Flächenbereichen zu bestimmen. Wenn die Ergebnisse der Messwerte zwischen den Einzelmikrofonpositionen stark voneinander abweichen, muss man zweckmäßig die Anzahl der Positionen erhöhen.

4.2.2 Messaufbau – Tonstudio

Der Messaufbau im Tonstudio erfolgt mit einem Mikrofon und der Schallquelle¹² im Aufnahme- und der Platzierung des Notebooks im Regieraum. Die Kabel wurden durch die Türspalte gelegt, die Tür wurde bei der Durchführung der Messung nur angelehnt, nicht vollständig geschlossen. Dieser Messaufbau sollte eigentlich genau so erfolgen wie eine frühere Messung mit Verfahren der integrierten Impulsantwort, die zwei Tage davor stattgefunden hatte, allerdings musste auf Grund der fehlenden unberrückichtigten Positionen, ein annähernd ähnlicher Aufbau gewählt werden. Die Quelle wurde ca. 1,43 m über dem Boden platziert, das Mikrofon 1,2 m.¹³

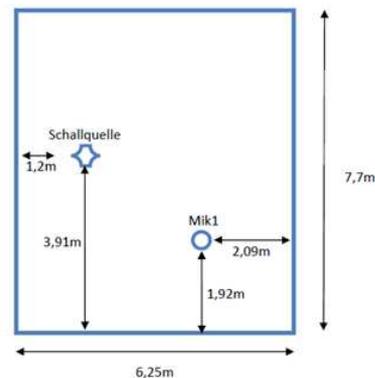


Abb. 6 Messaufbau im Tonstudio

4.2.3 Messaufbau – Saal der freien Christengemeinde

Für die Messungen wurden zwei Mikrofone verwendet, die an unterschiedlichen Positionen aufgestellt wurden. Die Quelle wurde fix vorne am Podest platziert und verblieb dort während des gesamten Verlaufs der Messungen. Das Notebook wurde

¹⁰ Mindestens drei Messpunkte

¹¹ z.B. Zonen über Bühne, Podien, Orchestergräben usw.

¹² Dodekaeder, Kugelförmige Schallquelle

¹³ Dieser Abstand entspricht der Höhe eines Ohrs eines durchschnittlichen Zuhörers auf typischen Sitzen.

auf einem Stehtisch hinten am Ausgang aufgebaut und von dort aus bedient. Eine Skizze des Grundrisses wird in der nachfolgenden Grafik dargestellt:

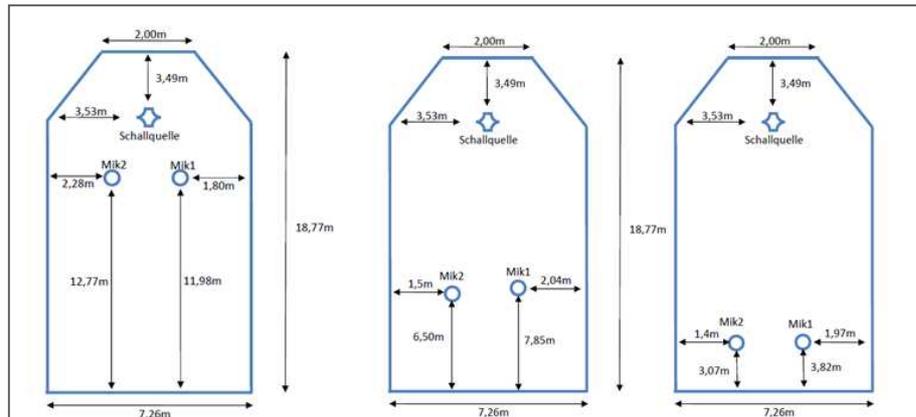


Abb. 7 Mikrofon-Positionen im Saal der FCG



Abb. 8 Foto des gesamten Messaufbau im Gemeindesaal

4.2.4 Geräte

Um einen Vergleich der Messungen zu ermöglichen, wurden bei beiden Messungen dieselben Geräte verwendet. Für das Tonstudio wurde lediglich ein einziges Mikrofon verwendet – im Gemeindesaal kamen zwei Mikrofone zum Einsatz.

Folgende Geräte wurden für die Messungen der Nachhallzeit verwendet:

Nach ÖNorm EN Iso 3382-2 [1]

AKG C 480 B Mikrofone

„Zur Ermittlung des Schalldrucks sind Mikrofone mit kugelförmiger Richtcharakteristik (Kugelmikrofone) zu benutzen, deren Ausgangssignale entweder:

- *direkt einem Verstärker, Filter und einem Gerät zur Darstellung der Abklingkurven oder einem Analysator zur Ermittlung der Impulsantwort zugeleitet werden oder zu einem Aufzeichnungsgerät zu späterer Analyse gelangen.*

- *Das Mikrofon sollte möglichst klein sein und vorzugsweise einen Membrandurchmesser von höchstens 13mm haben. Mikrofone mit Durchmesser bis zu 26mm sind zulässig, wenn sie reine Druckempfänger oder als Freifeld-Mikrofone mit einem Diffusor-Vorsatz ausgestattet sind, womit sich bei diffusem Schalleinfall eine frequenzunabhängige Übertragungscharakteristik ergibt.*¹⁴[10]

K&M Mikrofonständer

Schallquelle: Nor-Sonic Dodekaeder

„Es sollte eine Schallquelle mit möglichst kugelförmiger Richtcharakteristik (Kugelstrahler) benutzt werden. Sie muss einen genügend hohen Schallpegel erzeugen, sodass sich Abkling-kurven mit dem erforderlichen Mindest-Dynamikbereich ohne ungünstigen Störpegel-Einfluss ergeben. Zur Messung ist eine Schallquelle erforderlich, deren Abstrahlung um wenigstens 45dB über dem Störpegel im jeweiligen Frequenzband liegt. Wenn nur T_{20} gemessen wird, so genügt es, einen Pegel von wenigstens 35dB über dem Störpegel zu erzeugen.“

Nor-Sonic Power Amplifier 260

RME Fireface 800

Notebook mit Soundkarte

Als Software kommt *WinMLS 2004* in der Zwei Kanal Version zum Einsatz.

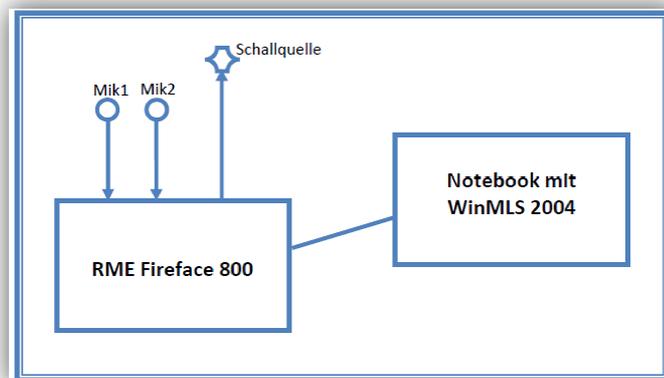


Abb. 9 Schematische Abbildung der Apparaturen zur Messung der Nachhallzeit mit WinMLS

„Übersteuerung darf auf keinen Fall in irgendeiner Stufe der Messapparatur auftreten. Beim Gebrauch von Impuls-Schallquellen sind zur Überwachung vor Übersteuerungen Spitzenwert-Anzeiger zu benutzen. [10]

¹⁴ [10](Graber) vgl. Anhang B /Raumakustik Skriptum k.9 S.169

4.2.5 Beschreibung der Messungen

Um raumakustische Gütemaße zu messen, benötigt man eine Kugelschallquelle, die durch das Dodekaeder repräsentiert wird. Dieses spielt das MLS-Signal ab und die Mikrofone messen die Raumsystemantwort. Mit Hilfe von *WinMLS* wird die Raumimpulsantwort für jeden Kanal ausgewertet. Die Samplerate wurde sowohl im Tonstudio, als auch im Gemeindesaal mit 44.1 kHz eingestellt.

Tonstudio

Im Tonstudio waren außer dem gleichbleibenden Geräuschpegel der Lüftung keine weiteren Einflussgrößen zu verzeichnen. Für die Messung der Nachhallzeit - wie schon vorhin beschrieben - wurde nur ein Mikrofon verwendet.

Die Wahl der $m = 16$ bezieht sich auf die vorhergegangene Überlegung, dass bei den raumakustischen Messungen zwei Tage zuvor¹⁵, eine Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen von ungefähr 0,7 s gemessen wurde.¹⁶

Die Ordnung m darf nicht zu klein gewählt werden, weil sonst Aliasing im Zeitbereich bei der Messung der Raumimpulsantworten auftreten kann. Allerdings sollte sie auch nicht zu groß sein, damit nicht unnötig lange Rauschen aufgenommen wird, das für die Messung nicht benötigt wird. Über die Software werden dann sowohl die Nachhallzeit, das Klarheitsmaß, als auch die quadrierte Impulsantwort grafisch dargestellt.

Saal der Freien Christengemeinde

Im Saal der freien Christengemeinde ist ebenfalls eine Raumbelüftungsanlage vorhanden, die allerdings ausgeschaltet werden kann. Die ersten drei Messungen fanden ohne eingeschaltete Lüftung statt. Eine vierte Messung wurde mit eingeschalteter Lüftung durchgeführt, um einen Vergleich ziehen zu können. Obwohl sich der Saal in einem Gebiet mit verstärktem Verkehrsaufkommen befindet, sind im Raum selbst keine Lärmeinflüsse von außen zu verzeichnen.

Wie bei der Messung im Tonstudio gilt es, die Nachhallzeit zuerst abzuschätzen, um die Ordnung wählen zu können. Die erste Ordnung betrug $m=18$, damit kein Aliasing auftreten konnte. Nach einem Testlauf wurde die Ordnung um eins erniedrigt auf $m=17$. Die Zahl m ist jene positive natürliche Zahl, mit der sich die Terzband-Mitten-Frequenzen aus dem folgenden Zusammenhang exakt errechnen, lässt: $fm = 10^m/10$ Hz

Ansonsten blieben die Einstellungen wie im Tonstudio beibehalten, außer dass in diesem Fall zwei Mikrofone pro Messung zum Einsatz kamen.¹⁷ Es wäre sonst auch möglich gewesen sechs oder acht Mikrofone zu verwenden. Für die drei Messungen wurden die beiden Mikrofone an jeweils unterschiedlichen Positionen aufgestellt, bei der vierten und letzten Messung wurde noch die Lüftung dazu geschaltet, um einen eventuellen Einfluss herausfiltern zu können. Im Raum selbst wurde für die Messungen nichts verändert, die Vorhänge blieben offen. Die Messbedingungen

¹⁵ Verfahren der integrierten Impulsantwort

¹⁶ ``m`` ist eine Einstellung der Ordnung in WinMLS Programm

¹⁷ Die Software WinMLS 2004 liegt nur in der 2 Kanalversion vor

sollten sich an die realen Bedingungen, an einen normalen Sonntagvormittag während eines Gottesdienstes, annähern.

Aufgenommene Messwerte

Mit Hilfe der *WinMLS* Software Version 2004 wird über die MLS – Kreuzkorrelationsmesstechnik die Raumimpulsantwort gemessen. Die Software übernimmt automatisch die Speicherung der einzelnen Ergebnisse und ermöglicht eine Berechnung der unterschiedlichen raumakustischen Gütemaße wie der Nachhallzeit, dem Deutlichkeitsmaß, dem Klarheitsmaß, usw. Die Grafiken können exportiert und so für die Protokollierung verwendet werden. Die einzelnen Messwerte sind ebenfalls als *.txt* exportierbar. Dies ermöglicht eine umfangreiche Weiterverarbeitung zur Darstellung, Erläuterung bzw. Interpretation der Ergebnisse.

4.2.6 Ergebnisse der Messung im Tonstudio

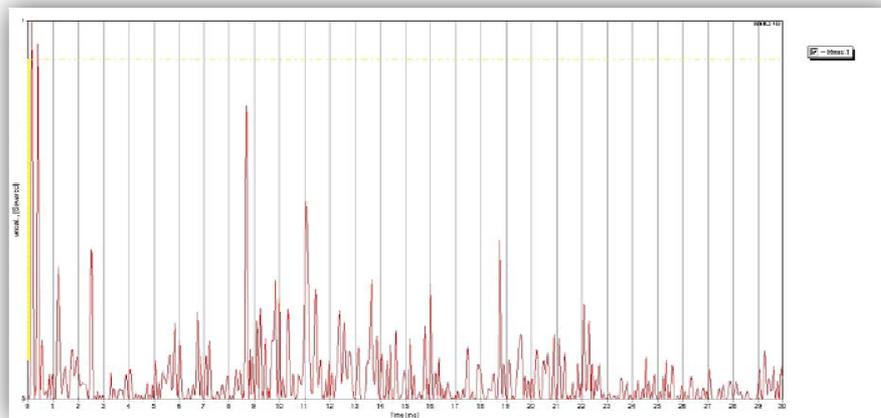


Abb. 10 Quadrierte Impulsantwort im Tonstudio

Abb. 10 zeigt die quadrierte Impulsantwort, die im Tonstudio gemessen wurde. Aus dieser lassen sich die folgenden Grafiken berechnen (Nachhallzeit, Klarheitsmaß).

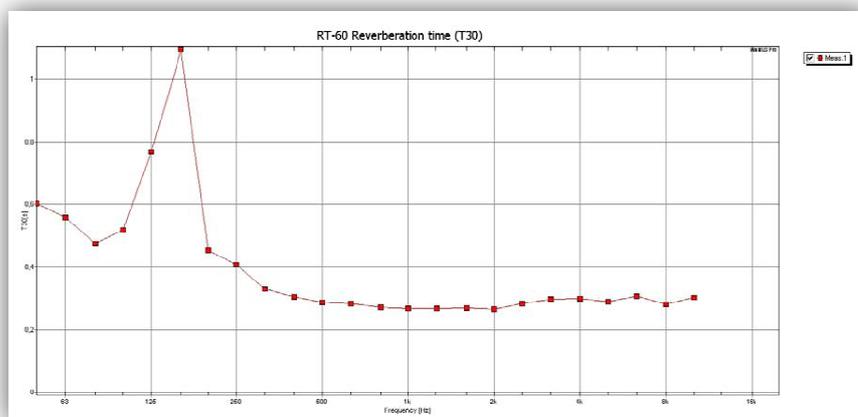


Abb. 11 Nachhallzeit im Tonstudio Zeit/Frequenzdiagramm(T/Hz)

Die Nachhallzeit weist, wie bereits zwei Tage zuvor festgestellt, bei ca. 160 Hz eine Raummode¹⁸ auf. Die MLS-Messung liefert also ein ähnliches Ergebnis. Für höhere Frequenzen pendelt sich die Nachhallzeit bei ca. 0,3 s ein.

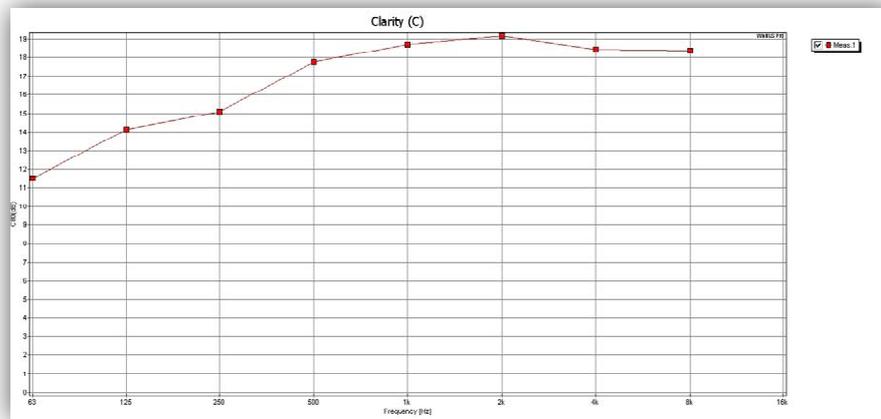


Abb. 12 Klarheitsmaß im Tonstudio

Wie aus der Grafik ersichtlich, ist das Klarheitsmaß im Tonstudio relativ hoch, was sicher einen gewünschten Effekt darstellt. Grundsätzlich wird in Tonstudios auf eine gute Durchsichtigkeit Wert gelegt, in diesem Fall ist dies deutlich erfüllt.

4.2.7 Ergebnisse der Messungen im Versammlungssaal

Die drei Messungen bei unterschiedlichen Mikrofon-Positionen lassen kaum Unterschiede in der Nachhallzeit erkennen, diese ist im gesamten Raum annähernd gleich und zeigt einen „Ausreißer“ im niederfrequenten Bereich. Jedoch zeigt sich interessanterweise, dass die Nachhallzeit zuerst abfällt, dann aber wieder nach oben ausschlägt, wie deutlich in der folgenden Grafik zu erkennen ist:

MikNr.	Position	Farbe
MIK.1	Vorne Rechts	Red
Mik.2	Vorne Links	Blue
Mik.1	Mitte Recht	Black
Mik2	Mitte Links	Green
Mik.1	Hinten Rechts	Red
Mik.2	Hinten Rechts	Purple

Tab. 4 Mikrofon Positionen und Farbe der Kurven

¹⁸ Raummoden bilden sich in den tiefen Frequenzen zwischen zwei reflektierenden Wänden.

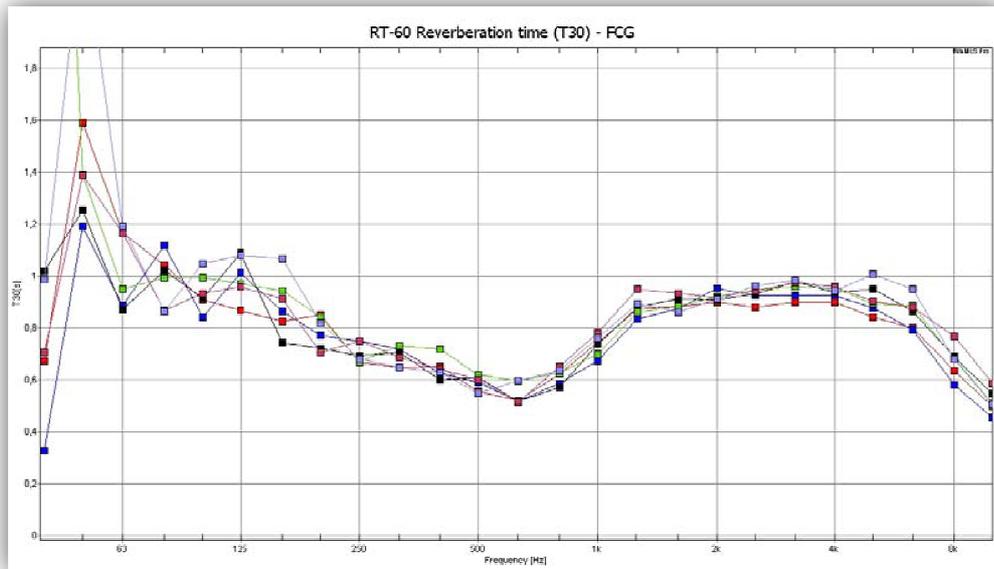


Abb. 13 Nachhallzeit im Saal der FCG

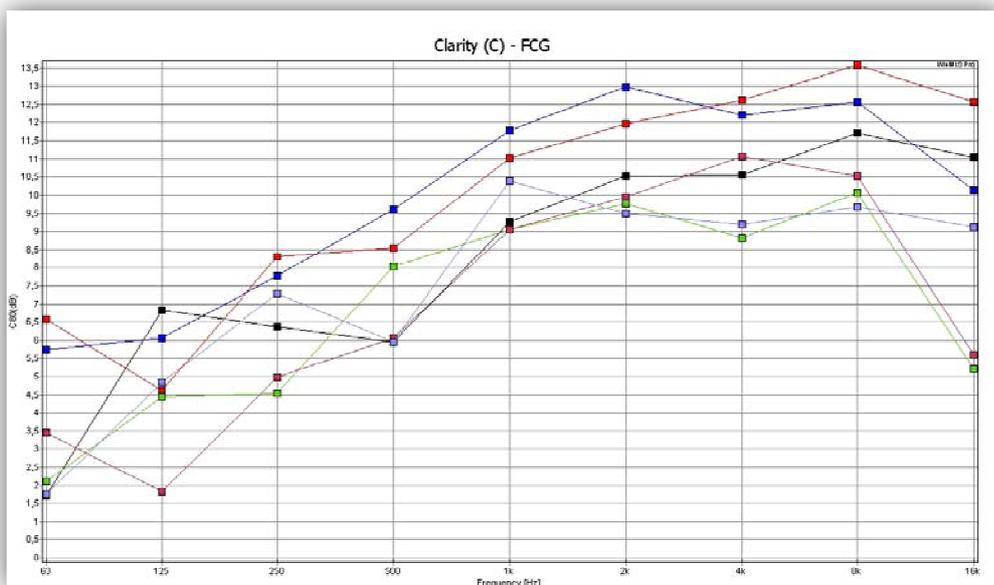


Abb. 14 Klarheitsmaß im Saal der freien Christengemeinde

Beim Vergleich des Klarheitsmaßes an den unterschiedlichen Mikrofon-Positionen lässt sich aus der Grafik ablesen, dass dieses im vorderen¹⁹ Bereich des Saales am höchsten ist. Nach hinten wird es konstant kleiner, was auch dem Empfinden im Raum entspricht.

¹⁹ Die blaue Raumimpulsantwort wurde vorne gemessen, die rote auf den hinteren Plätzen.

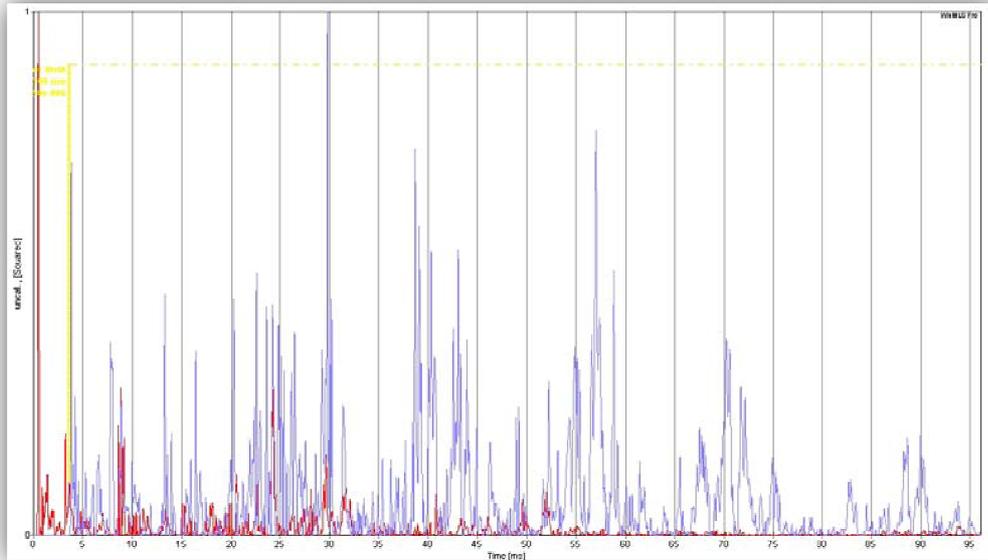


Abb. 15 Quadrierte Impulsantwort im Saal der freien Christengemeinde

Die obige Grafik zeigt die quadrierte Impulsantwort an zwei verschiedenen Stellen: Zum einen an einer Position des Mikrofones in den vorderen Sitzreihen, zum anderen relativ weit hinten. Hier sind deutlich die Unterschiede zu erkennen.

Um Aufschluss über den Einfluss der Lüftung zu bekommen, wurde eine abschließende vierte Messung durchgeführt, die aber kaum veränderte Messwerten erbrachte. Für die Veranschaulichung wurde die Nachhallzeit an derselben Mikrofon-Position gezeigt - einmal mit (rote Kurve) und einmal ohne (blaue Kurve) Lüftung:

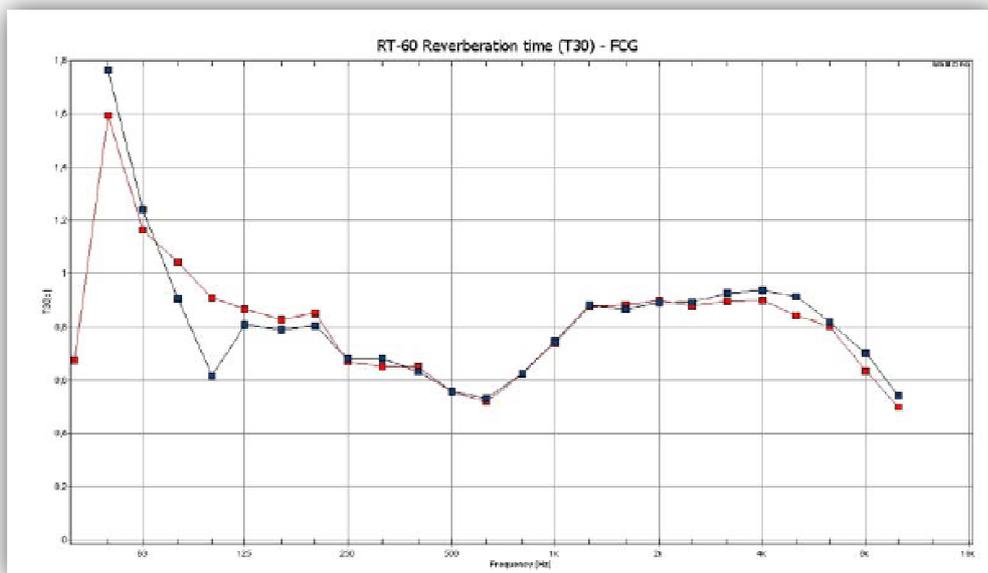


Abb. 16 Nachhallzeit mit eingeschalteter Lüftung

5 Raumakustische Simulation

Für kleinere geometrisch unkomplizierte Räume sind graphische und mathematische Verfahren sehr gut geeignet. Die Nachhallzeit nach Sabine lässt sich zum Beispiel mittels einfacher Verfahren berechnen. Für komplizierte oder größere Projekte sind Rechnerunterstützte Simulationen besser geeignet.

Die Raumakustischen Computer-Simulationen wurden in den letzten Jahren perfektioniert. Seit Ende der 60er Jahre werden Simulationsverfahren für die Schallausbreitungsvorgänge in Räumen genutzt. Sie gehen davon aus, dass sich die Schallenergie in einem Raum geradlinig ausbreitet. Solche Simulationsverfahren stellen eine hilfreiche Unterstützung im raumakustischen Planungsprozess dar, aber ihre Einsatzmöglichkeit ist begrenzt. Der Grund dafür liegt darin, dass die Wellennatur des Schalls in Rechen-technischen Simulationsverfahren vernachlässigt wird und damit die Beugungserscheinungen nicht erfasst werden. Daher ist es nicht möglich Oberflächenstrukturen, welche tieffrequenten Schall beugen, zu optimieren. (z.B.: Theaterränge)

Bei Beugungserscheinungen kann sich die Schallwelle im geometrischen Raum des Hindernisses zum Beispiel bei Spalt, Gitter, Fangspiegel usw. ausbreiten. Zur Beugung kommt es durch Entstehung neuer Wellen entlang einer Wellenfront. Diese können durch Überlagerung zu Interferenzerscheinungen führen. Die folgenden Bilder stellen die Entstehung von Kugel- oder Zylinderwellen aufgrund Lochdurchmesser oder Schlitzbreite in einen Körper, welche deutlich kleiner als die Wellenlänge sind, dar.[6][10]

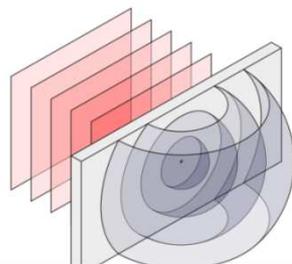


Abb. 17 Kugelwellen/Lochdurchmesser kleiner als die Wellenlänge

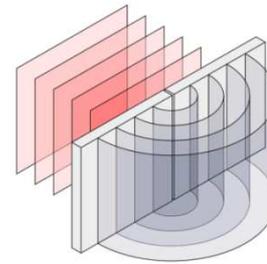


Abb. 18 Zylinderwellen/Schlitzbreite kleiner als die Wellenlänge

5.1 Die Raumimpulsantwort

Die Raumimpulsantwort zu bestimmen ist auch eines der Hauptziele von verschiedenen Computer Simulationen. Es gibt prinzipiell unterschiedliche Verfahren um die Raumimpulsantwort zu bestimmen, nämlich die Spiegelquellenmethode einerseits und das Strahlverfolgungsverfahren (*Ray Tracing*), sowie dessen verwandte Methode, das Schallteilchen-Simulationsverfahren, andererseits.

Mittels der Raumimpulsantwort kann man die Verteilung der eintreffenden Reflexionen an einem Hörerort darstellen. *Abb. 19* beispielsweise zeigt die Schallreflexionen nach Anregen eines Raumes mit einem kurzen Schallimpuls in Folge der Zeit.

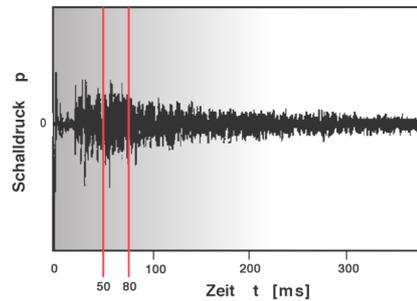


Abb. 19 Beispiel einer Raumimpulsantwort

Da eine solche Raumimpulsantwort das Schallfeld theoretisch vollständig beschreibt, ist ihre Anwendung für Rechnersimulationen von Vorteil. Anhand der Raumimpulsantwort lassen sich die Energiekriterien durch Integration des Schalldrucks berechnen.

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p^2(\tau) d\tau \quad \text{Glg. 2}$$

5.2 Die Energiekriterien

Die Energiekriterien entsprechen dem Verhältnis der Energie von Direktschall W_D , Anfangsreflexionen W_I und Nachhall W_R zur Gesamtenergie. Störende Reflexionen, wie etwa Echos, lassen sich auch in der Raumimpulsantwort beschreiben. Während der Direktschall die ungestörte Schallausbreitung an allen Plätzen ist, tritt der Energieanteil der Anfangsreflexionen - bei Sprache bis etwa 50 ms und bei Musik bis etwa 80 ms - in kurzem zeitlichen Abstand zum Direktschall auf.

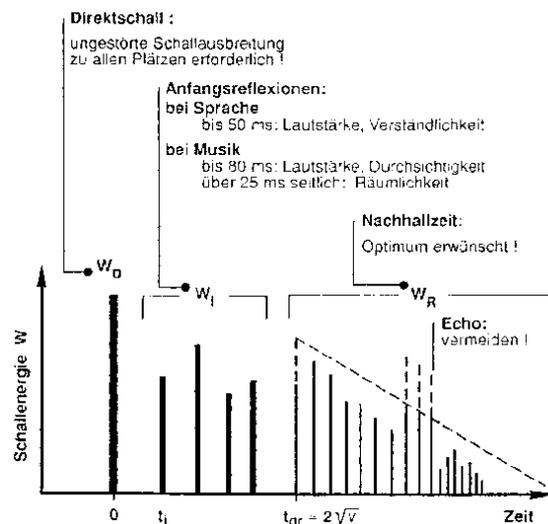


Abb. 20 Schematisierte Raumimpulsantwort [6]S.149

- t_i ms Zeit zwischen Direktschall und erster Reflexion (Initial Time)
- t_{gr} ms Grenzzeit für den Übergang von Reflexionen zu diffusen Reflexionen
- V m³ Volumen

Von der Gesamtenergie W_{Ges} , welche am Hörerort eintrifft, sind im Allgemeinen nur einen Anteil von 5% bis 10% Direktschall und 10% Nachhall. Etwa 80% der Energie wird von den Anfangsreflexionen errungen.

Die Nachhallzeit (*Reverberation Time RT60*):

Die Nachhallzeit in der Raumakustik ist jene Zeit, die nach Impulsanregung den Abfall des Gesamtschalldruckpegels von 0 dB SPL bis -60 dB SPL beschreibt.[1]

Direktschall D:

Der Direktschall D beschreibt in der Raumakustik jenen abgestrahlten Schall einer im Raum befindlichen Schallquelle, der als erstes Hörereignis am Hör- bzw. Messort eintrifft (ohne Reflexionen). Der Direktschall D beschreibt damit maßgeblich die empfundene Herkunftsrichtung (Lokalisation) der Schallquelle im Raum (Haas- bzw. Präzedenz-Effekt). Damit kann der Direktschall (zumindest in großen Räumen) leicht aus dem Eintreffen der Schallereignisse am Hörerort nachempfunden und somit bei der Betrachtung von Raumimpulsantwort detektiert werden.[10]

Frühe Reflexionen:

Die frühen Reflexionen beschreiben in der Raumakustik jene reflektierten Schallereignisse einer im Raum befindlichen Schallquelle, die als erste Hörereignisse nach dem Direktschall D am Hör- bzw. Messort eintreffen (Reflexionen erster bzw. zweiter Ordnung). Die frühen Reflexionen sind dabei hauptverantwortlich für den Beitrag zur „empfundenen Räumlichkeit“ in einem Raum.

Anfangsnachhallzeit: (*Early Decay Time EDT*)

Da der Anfangsteil des Abklingvorgangs im Allgemeinen besser wahrgenommen wird als ein gesamter 60 dB Abfall der Nachhallzeit, dominiert dieser Anfangsteil auch den subjektiv empfundenen Nachhall. Die EDT wird aus dem ersten 10dB Abfall des Nachhalls durch Extrapolation zum definierten 60 dB Abfall der Nachhallzeit ermittelt. In einigen Fällen werden auch 15 oder 20 dB gebraucht.

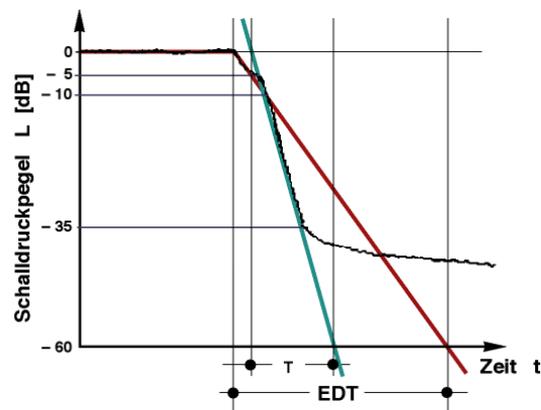


Abb. 21 Nachhallzeit T und Anfangsnachhallzeit EDT [6]S.141

5.3 Simulationen mit CATT Acoustic (Computer Aided Theatre Technique)

In diesem Abschnitt werden drei Räume mit Hilfe des Programms *CATT-ACOUSTIC* akustisch simuliert und miteinander verglichen. Die ersten zwei Räume wurden bereits in Kapitel 2 vorgestellt. Der erste Raum, der als Vergleich der Messung der Nachhallzeit und des Klarheitsmaßes mittels MLS Methode gedient hat, ist das Tonstudio. Der zweite Raum ist der Saal der Freien Christen Gemeinde. Die Sanierungsmaßnahmen für diesen Saal werden in *Kapitel 9: „Optimierung der Raumakustik“* mit einem dritten Raum verglichen. Es handelt sich um den Hörsaal i2 der sich im Institutsgebäude der Technischen Universität Graz befindetet. Der HS i2 wurde in Sommer 2006 akustisch saniert.

CATT Acoustic

Bei dem Softwareprogramm *CATT-Acoustic*²⁰ handelt es sich um ein raumakustisches Werkzeug. Mit dieser Software ist es möglich, die Akustik von Räumen zu simulieren. Diese Simulationen finden Anwendung in den raumakustischen Planungsprozessen von Räumen. Die Ergebnisse solcher Simulationen bieten bereits vorab einen Überblick über die zu erwartende Akustik.

CATT bietet drei Berechnungsmethoden:

- *Strahlverfolgungsmethode (Ray Tracing)*
- *Spiegelschallquellenverfahren (Image Source Model, ISM)*
- *Randomized tail-corrected cone -Tracing (RTC)*

In einem virtuellen Koordinatensystem innerhalb eines *GEO*-Files werden die Eckpunkte definiert, zwischen denen man dann alle Flächen aufspannen kann. Auf diese Weise können dann Räume in allen Formen erstellt werden. Den einzelnen Flächen können akustische Eigenschaften, wie zum Beispiel Absorption, zugewiesen werden.

Die akustische Prognose der raumakustischen Parameter erfolgt dann über die oben genannten Methoden. Bei der Strahlverfolgungsmethode gehen von der Schallquelle kugelförmige Schallstrahlen aus, die mit Laufe der Zeit ihren Querschnitt vergrößern. [10]

²⁰ Die Simulationen sind zunächst in einer Demoversion erstellt worden. Für die raumakustische Auswertung und die Auralisation wurde dann die Vollversion CATT-Acoustic v8.0b verwendet.

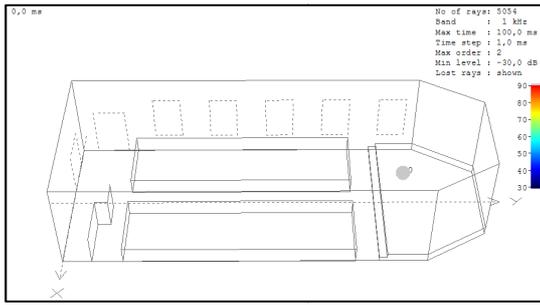


Abb. 22 Ray Tracing nach Zeit 0 ms

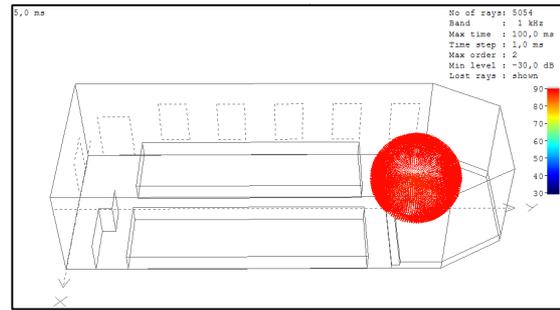


Abb. 23 Ray Tracing nach Zeit 5 ms

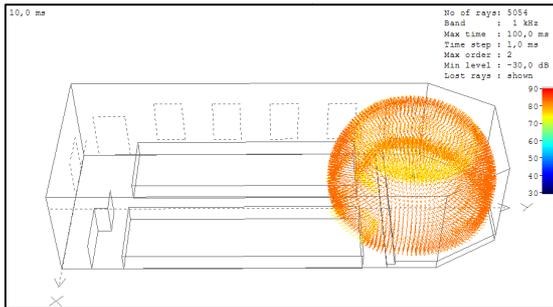


Abb. 24 Ray Tracing nach Zeit 10 ms

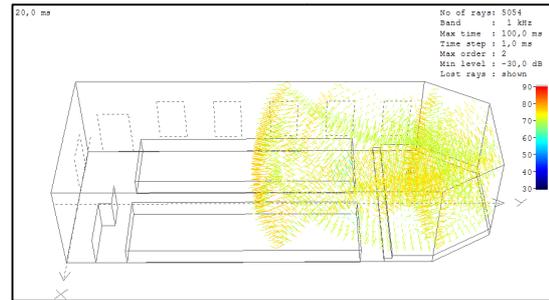


Abb. 25 Ray Tracing nach Zeit 20 ms

Der Zuhörerbereich wird in einzelne Detektorfelder geteilt. Werden die Schallstrahlen durch ein solches Feld geschickt, so bekommt es in einer bestimmten Laufzeit die entsprechende Energie zugeordnet. Eine Fläche oder mehrere werden gewählt als *Audience Area Mapping* und dadurch werden raumakustische Parameter auf dieser Ebene farbcodiert dargestellt.

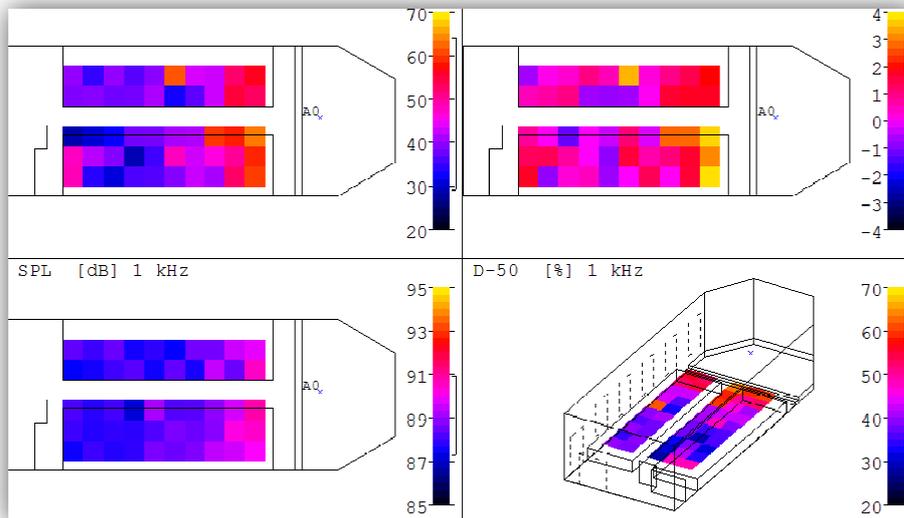


Abb. 26 Beispiel für eine Audience Area Map vier Gütemaße

Wie die obige Abbildung *Abb. 26* beispielweise darstellt, werden über diese Methode die raumakustische Parameter wie der Deutlichkeitsgrad D_{50} , das Klarheitsmaß C_{80} und der Schalldruck SPL definiert.

Andere raumakustische Parameter sind das Deutlichkeitsmaß C_{50} , der Seitenschallgrad LF , das Stärkemaß G , die Schwerpunkzeit T_s , die Sprachübertragungsindizes STI und $RASTI$. Allerdings werden in dieser Arbeit nicht alle Parameter berücksichtigt.

Das Spiegelschallquellenverfahren (*Image Source Model, ISM*) ermöglicht geometrische Reflexionen mit Hilfe von Spiegelquellen darzustellen. Das *Early part detailed*²¹ *ISM* arbeitet nach dieser Methode und dient dazu, die frühen Reflexionen im Raum zu untersuchen. Die Energie der Einzelreflexionen wird in Dezibel dB durch ein berechnetes Echogramm über die Zeit in ms gezeigt.

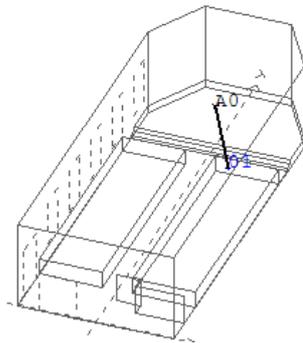


Abb. 27 Verfahren der Maximum Length Sequence

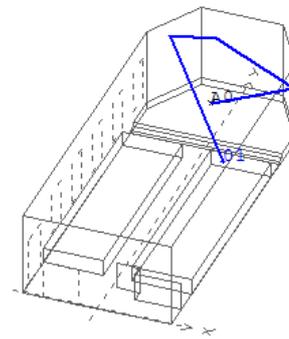


Abb. 28 Direktschall Schallquelle / Empfänger

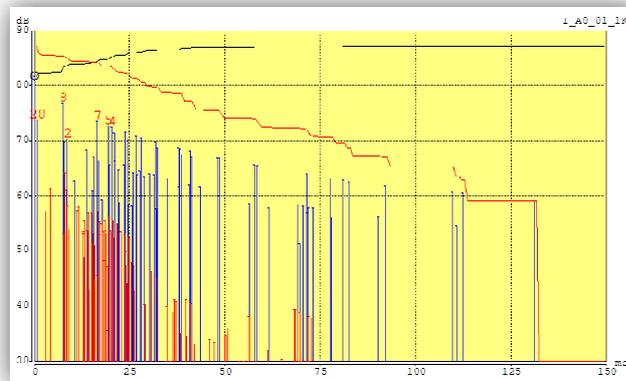


Abb. 29 Beispiel eines Echogramms

Blaue Linie mit Ring: Direktschall, blaue Linien: frühere Reflexionen, rote Linien: diffuse Reflexionen, Ziffern: Nummer der Reflexionsfläche

Die *Full detailed Calculation* verwendet *randomized tail -corrected cone-tracing (RTC)*, welche die ersten zwei Verfahren, *Stahlenverfolgungsmethode* und *Spiegelquellenmethode*, miteinander vereint. Wie der Name selbst sagt, handelt es sich um eine volle detaillierte Berechnung, die Echogramme und raumakustische Parameter für eine bestimmte Abhörposition liefert. Vektorgramme, die ein anderer

²¹ Early part detailed ist eine Funktion von Catt Acoustic um ISM Berechnung durchführen zu können

Darstellungsmodus des Echogrammes, sowie Sound Roses können dadurch erstellt werden.

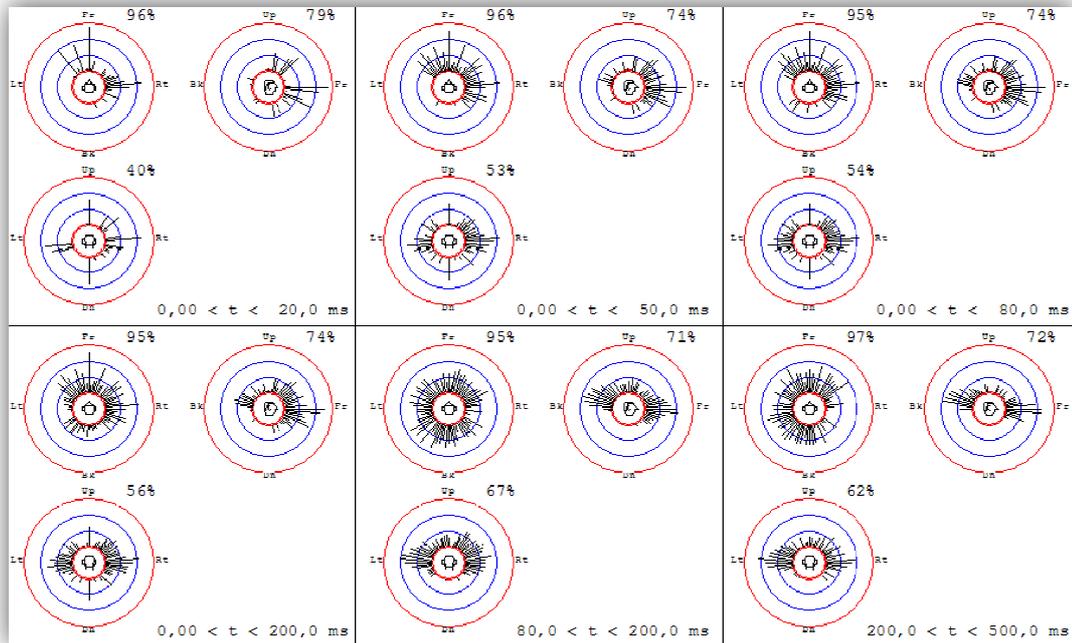


Abb. 30 Sound Roses. Reflexionen in sechs verschieden Eintreffzeit Intervallen.

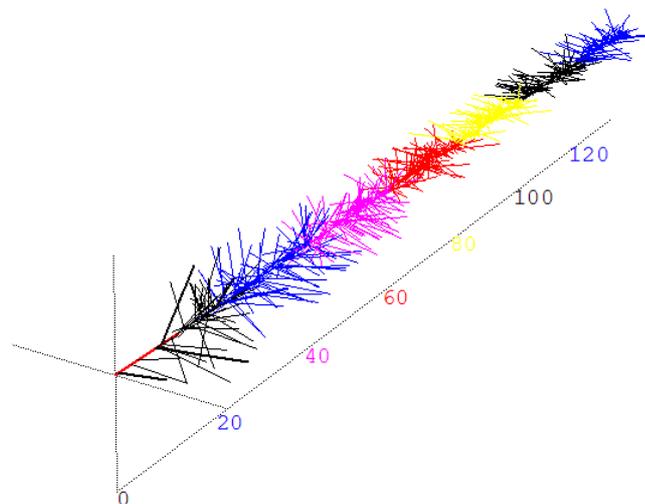


Abb. 31 Beispiel eines Vektorgramms. Die Eintreffzeit der Reflexionen ist farblich codiert.

Aufgrund dieser CATT-Algorithmen sind Berechnungen der Nachhallzeit, Energiebetrachtungen im Raum und *Auralisation* möglich.[6][10]

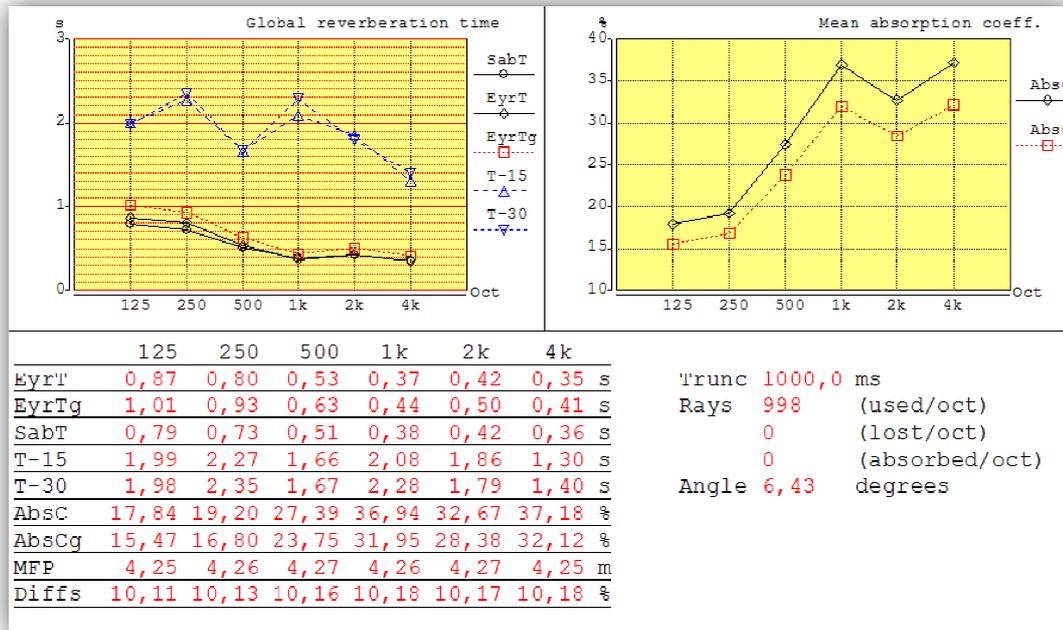


Abb. 32 Beispiel eines Nachhallzeitfrequenzganges

EyrT...Nachhallzeit nach Eyring in [S]
 SabT...Nachhallzeit nach Sabine in [S]
 AbsC...Mittlere Absorptionsgrad, Flächen werden je nach auftreffender Schallenergie gewertet in [%]
 AbsCg...Mittlere Absorptionsgrad, alle Fläche werden gleich gewertet in [%]
 MFP...Mittlere freie Weglänge in [m]
 Diff...Mittlerer Streugrad

6 Die drei Räume

Das Tonstudio sowie der Hörsaal I2 gehören zum Institut für Breitbandkommunikation und befinden sich im Gebäude Inffeldgasse 12 der TU in Graz. Diese zwei Räumlichkeiten wurden im Jahr 2004 untersucht. Messungen mit *WinMLS* sowie eine akustische Simulation mit Hilfe von *Catt-Acoustic* wurden durchgeführt.

Da die optimale Bestimmung der Nachhallzeit von dem Verwendungszweck des Raumes abhängig ist, wurden diese zwei Räume ausgewählt und anschließend mit dem Saal der FCG verglichen.

6.1 Saal der FCG

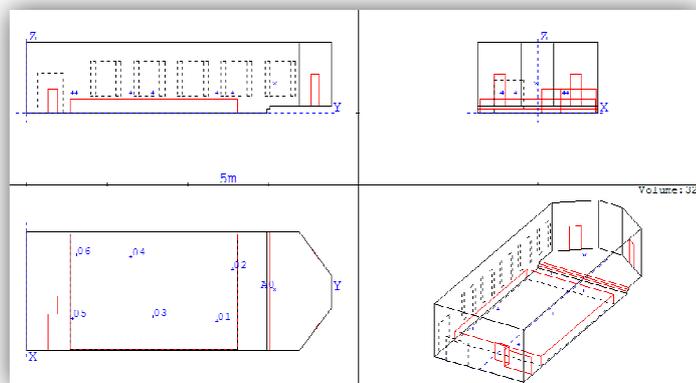


Abb. 33 Catt-Modell: Saal der FCG

Der Saal der FCG besitzt einen einfachen Grundriss. Im Bereich des Podiums sind die vorderen Wände leicht geneigt. Das Podium liegt vierzig Zentimeter über der Fußbodenoberkante und ist mit einem Teppich belegt. Der Boden ist mit Linoleum belegt und die Wände glatt verputzt. Die roten Linien stellen die zwei Stufen in Podium Bereich und eine Holzwand in hinteren Bereich, wo sich das Mischpult befindet, dar. Der Quader in der Mitte soll den 120 gepolsterten Stühlen für das Publikum repräsentieren. A0 stellt eine kugelförmige Schallquelle dar und die Mikrofonpositionen 01 bis 06 wurden in selben Positionen wie bei der Messung mit *WinMLS* modelliert.

6.1.1 Programmcode

Alle für den FCG Saal verwendeten Dateien und Daten befinden sich im Ordner FCG Graz. Im Programmcode **Master.geo** wurden zur Vereinfachung einige Variablen eingeführt, die sich im Wesentlichen auf die Hinterseite des Raumes beziehen. Catt erlaubt es globale und lokale Variablen zu definieren, die eine schnelle Änderung des Raumes z.B.: Tiefe des Raumes während des Optimierungsprozess ermöglichen.

```
LOCAL t=18,87 ; Raumtiefe
```

Durch die Funktion **INCLUDE** können weitere Geo-Files in das aktuelle Master.geo - File integriert werden. So kann man neue Oberflächen, Möbel, Publikum, usw. einfach ein-und ausschalten.

INCLUDE Auditorium

Mit der Funktion **ABS** kann die Absorptionsgrade von Materialien in der verschiedene Frequenzen Oktaven definieren, die später den Flächen zugeordnet werden. Diese Funktion ist entscheidend für die Prognose in Catt. Eine Falsche Auswahl von den verschiedenen Materialien bzw. Absorptionsgrade, kann zu einem falschen Ergebnis der verschiedenen Gütemaßen führen. Je höher der Absorptionsgrad ist, desto mehr werden die Frequenzen gedämpft.

ABS Fensterglas < 0,25 0,15 0,10 0,05 0,03 0,03 >

In folgende Tabelle sind Schallabsorptionsgrade verschiedener Materialien zu finden:

Material	Frequenz in Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Fensterglas	0,25	0,15	0,10	0,05	0,03	0,03
Beton	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Verputzte Flächen	0,03	0,03	0,02	0,04	0,05	0,08
Teppichboden	0,02	0,04	0,06	0,20	0,25	0,30
Gipskartondecke	0,11	0,09	0,04	0,02	0,03	0,00
Akustische Decke	0,43	0,62	0,67	0,80	1,00	1,03

Tab. 5 Schallabsorptionsgrade verschiedener Materialien [6]s.148

Die Funktion **CORNERS** definiert die Ecken, zwischen denen durch die Funktion **PLANES** die Oberflächen aufgespannt werden.

CORNERS

```
; id    x    y    z
1      -b/2  0    0
2      -b/2  t    0
```

PLANES

```
; PLANES ID Name/Corners id... /Material (ABS)
[1 Boden      /1 6 47 46/ Boden]
[2 Decke      /11 12 13 14 15 16/ Deckenverkleidung]
```

6.1.2 Ergebnisse der Simulation

Nachhallzeit T_{30}

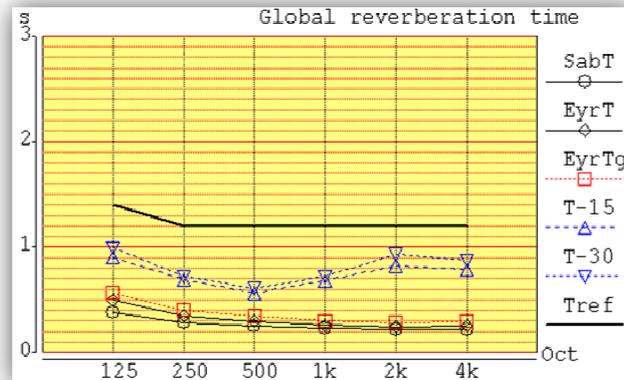


Abb. 34 Nachhallzeit des FCG Saals in Catt

In der Abbildung *Abb. 34* sind mehrere Nachhallzeiten zu erkennen: T_{ref} , T_{-15} , T_{-30} , die Nachhallzeit nach Sabine $SabT$ und $EyrT$ nach Eyring. Relevant für diese Masterarbeit sind in dieser Abbildung nur T_{30} und T_{ref} . T_{30} ist die Nachhallzeit, die vom Abschalten der Schallquelle bis zum Absinken des Schallpegels um 30 dB Dezibel verstreicht. Die Messung der Nachhallzeit mit *WinMLS* wurde auch in T_{30} definiert. Die Referenzlinie T_{ref} wird durch eine Schwarze Linie dargestellt und entspricht die Sollnachhallzeit nach DIN 18041²² für Sprache und Musik.

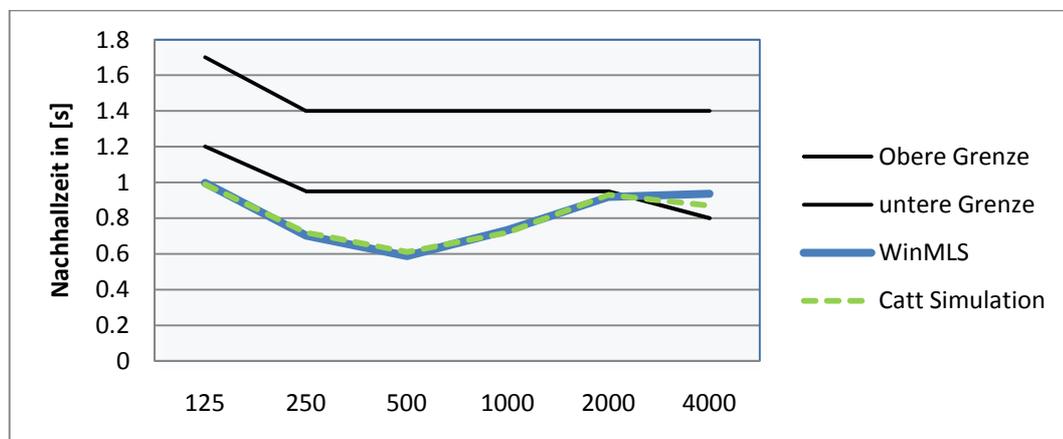


Abb. 35 gemittelte Nachhallzeit mit WinMLS und Catt des FCG Saals

Die realen Messwerte mit *WinMLS* liefern bereits ein besonderes Verhalten der Nachhallzeit. Man erkennt ganz deutlich, dass sich in Bereich zwischen 500 Hz und 100 Hz ein Anstieg der Nachhallzeit ergibt. Das bedeutet, dass der gesamten Absorptionsgrad gewisser Oberfläche für die Hohen Frequenzen nicht genug oder schlecht dämpfen. Zunahme der Nachhallzeit im Laufe der Zeit kann durch spätere Reflexionen verursacht werden. Catt-Acoustic zeigt ebenfalls einen Sprung im selben Bereich. Ein Unterschied von 0,29 s bei 125 Hz zwischen die Modellprognose

²² Deutsche Norm DIN 18041 – Hörsamkeit in kleinen bis Mittelgroßen Räumen

und die WinMLS-Messung ist zu erkennen. Diese Abweichungen sind zu erwarten da beide Kurven wurden aus sechs Verschiedenen Messpositionen arithmetisch gemittelt. (siehe Abb. 13) Insgesamt ist die Nachhallzeit nicht so groß wie erwartet und liefert einen Mittelwert aller Frequenzen von ca. 0,86 s. Der Verwendungszweck der FCG ist Sprache und Musik und liegt unter der Sollnachhallzeit T_{ref} . Die Anforderungen für eine optimale Akustik nach Din 18041 werden hier nicht erfüllt. Die folgende Tabelle stellt zu den Graphiken noch einmal die Zahlenwerte gegenüber.

F[Hz]	125	250	500	1K	2K	4K
WinMLS	1,00	0,70	0,59	0,73	0,92	0,94
CATT	0,99	0,69	0,6	0,734	0,95	0,94

Tab. 6 Nachhallzeit in WinMLS und in Catt

Gütemaße im Saal der FCG

Aus der Raumimpulsantwort (siehe Abb. 20) im Bereich der Anfangsreflexion W_I können durch Integration des Schalldrucks sowohl bei Sprache als auch bei Musik jeweils wichtige objektive Maße für den akustischen Eindruck berechnen werden:

Bei Sprache liegt der Energieanteil etwa in einem Zeitbereich von 50 ms nach dem Direktschall. Das Deutlichkeitsmaß C_{50} [dB] bzw. der Deutlichkeitsgrad D_{50} [%] beschreibt die Qualität der Verständlichkeit in einem Raum.

$$D_{50} = \frac{W_{0..50}}{W_{ges}} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} \quad [\%] \quad \text{Glg. 3}$$

$$C_{50} = 10 \log \frac{W_{0..50}}{W_{ges}} = 10 \log \frac{\int_0^{50ms} p^2(t)dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t)dt} \quad [dB] \quad \text{Glg. 4}$$

$W_{0..50}$... in der Zeit von 0 bis 50 ms beim Hörer einfallende Energie
 t ...Zeit
 p ...Schalldruck
 D_{50} Deutlichkeitsgrad in [%]
 C_{50} Deutlichkeitsmaß in[dB]

Für die Beurteilung eines Raumes bezüglich der Qualität der Verständlichkeit wird folgende Tabelle herangezogen:

$D_{50} > 50\%$	gute Verständlichkeit
$C_{50} > 2 \text{ dB}$	sehr gute Verständlichkeit
$2 \text{ dB} > C_{50} > -3 \text{ dB}$	gute Verständlichkeit
$-3 \text{ dB} > C_{50} > -8 \text{ dB}$	noch ausreichende Verständlichkeit

Tab. 7 Deutlichkeitsgrad-maß

Durch die Funktion *Audience Area Mapping* lassen sich in CATT verschiedener raumakustische Parameter wie D_{50} auf eine bestimmte Ebene farbcodiert darstellen.

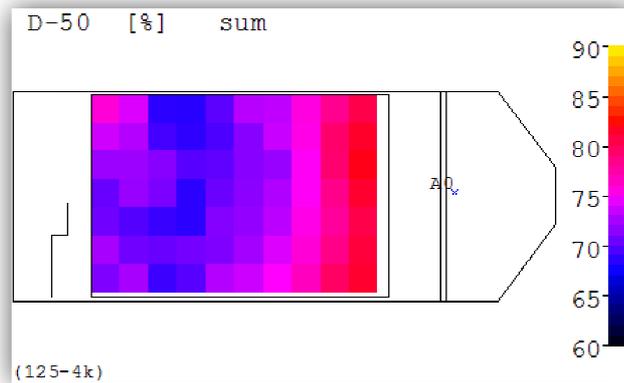


Abb. 36 Deutlichkeitsgrad in [%]

Abb. 36 zeigt ganz deutlich in welchen Bereich die Verständlichkeit der Sprache am größten ist. Hier ist der Deutlichkeitsgrad D_{50} größer als 50%, d.h. dass die Verständlichkeit der Sprache in gesamten Saal eine gute Qualität erreicht. Wie erwartet, haben die Sitzplätze in den vorderen Bereichen bezüglich der Verständlichkeit einen größeren Vorteil gegenüber den anderen Sitzplätze. Vor allem bei einer Frequenz von 500 Hz erreicht der Deutlichkeitsgrad (wie in folgende Abbildung dargestellt ist.) einen Mittelwert von etwa 92,5 %. Dadurch, dass der Versammlungsraum der FCG teilweiser auch für Predigen benutzt wird, ist nach der Beurteilung des Deutlichkeitsgrades, dieser Raum für Sprache sehr gut geeignet.

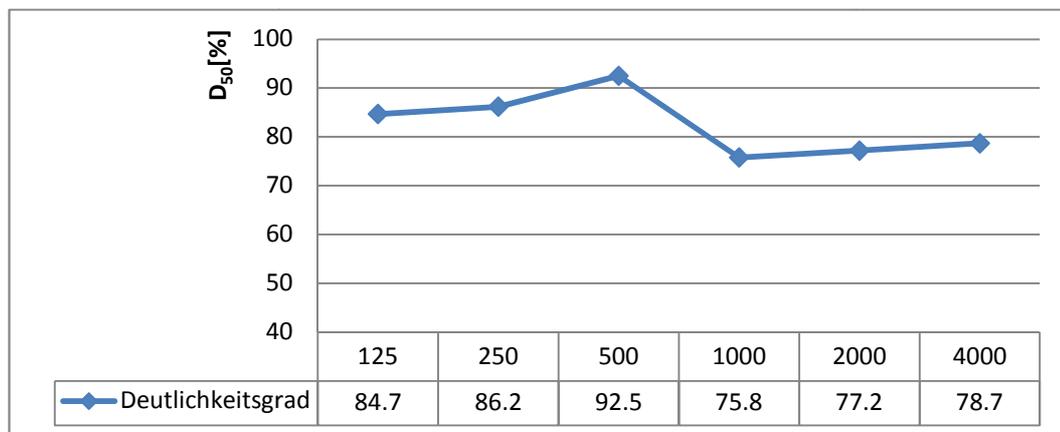


Abb. 37 gemittelte D_{50} in [%] der FCG

In Räumen für Musik gibt es größere Schwankungsbreiten bei der Gütebewertung im Vergleich zur Sprache. Der Grund dafür ist, dass in der Regel Musikrezeption auch durch andere nicht akustische Wahrnehmungen, wie zum Beispiel optische oder emotionale Bedingungen beeinflusst werden. Dennoch gibt es heute verschiedene raumakustische objektive Kriterien für den Musikeindruck. Als objektiver Wert wird meistens das Klarheitsmaß C_{80} (Clarity) genommen das bis 80ms nach dem Direktschall eintrifft.

$$C_{80} = 10 \log \frac{W_{0..80}}{W_{80..\infty}} [dB] \quad \text{Glg. 5}$$

Das Klarheitsmaß beschreibt die Durchsichtigkeit. In anderen Worten beschreibt es die Erkennbarkeit von verschiedenen Tönen, die zeitlich aufeinander folgen und

ermöglicht die Unterscheidbarkeit verschiedener Instrumente während des Spielens der Musik. Im Gegensatz zur Sprachverständlichkeit geht es bei der Durchsichtigkeit um ein Gebiet optimaler Werte und nicht um einen Grenzbereich. Es zeigt das Verhältnis der Schallenergie vor und nach 80 ms. d.h. dass die Durchsichtigkeit nicht so groß werden darf. Eine hohe Durchsichtigkeit von Musik wird bei $C_{80} > 0\text{dB}$ erreicht, bei Werten zwischen -3 dB und 0 dB wird der Zuhörer von der Musik umhüllt.

$0\text{ dB} < C_{80}$	Hohe Durchsichtigkeit von Musik
$-3\text{ dB} < C_{80} < 0\text{ dB}$	Musik umhüllt Zuhörer

Tab. 8 Klarheitsmaß Beurteilung Kriterien

Für Musik sollte C_{80} zwischen -1 und $+5$ liegen. Für Orchestermusik zwischen -1 und $+3$. Generell kann man sagen: Für percussive Musik gilt ein hohes Klarheitsmaß und für symphonische Musik ein geringes Klarheitsmaß.

In folgende Abbildung ist durch die Funktion Audience Area Mapping in Catt das Klarheitsmaß C_{80} auf die Publikum Ebene farbcodiert dargestellt.

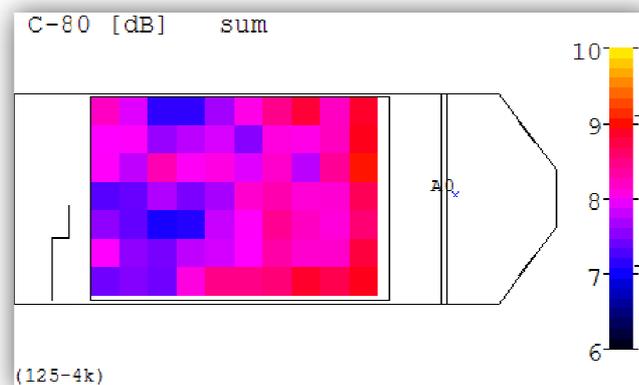


Abb. 38 Klarheitsmaß in [dB]

Abb. 38 zeigt das Klarheitsmaß in den verschiedenen Bereichen. Man erkennt sofort, dass das Klarheitsmaß über die 6 dB liegt, in den vorderen Sitzplätzen liegt das C_{80} um etwa die 9 dB . Dieses Bild entspricht einer sehr hohe Durchsichtigkeit von Musik. Mittels *WinMLS* wurde auch dieses Gütemaßes gemessen und wird in folgende Graphiken mit den Catt Ergebnissen verglichen.

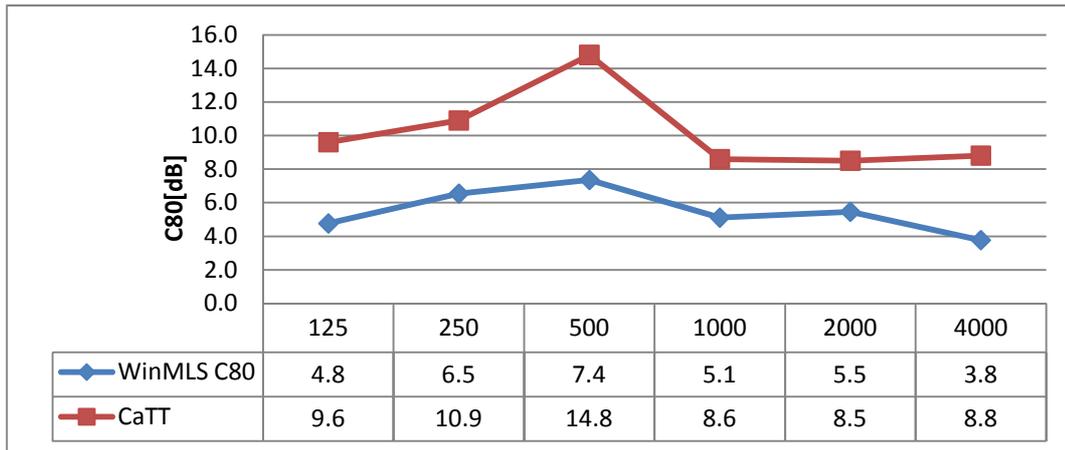


Abb. 39 Klarheitsmaß in Catt und WinMLS

Die reellen gemittelten Ergebnisse des Klarheitsmaßes bei *WinMLS* sind eindeutig kleiner als die Ergebnisse bei *Catt*. Dennoch liegen die reellen Werte ab 250 Hz über die 5 dB, welchen einer höheren Durchsichtigkeit der Musik entsprechen. Beide Graphiken zeigen einen Sprung bei 500 Hz und eine lineare Absenkung des Klarheitsmaßes bei 1000 Hz.

6.2 Tonstudio

Das Tonstudio ist einem Regieraum direkt angeschlossen. Er dient als Aufnahmezimmer. Neben der Hauptnutzung als Studio findet der Raum auch bei Lehrveranstaltungen, wie z.B. Studiomesstechnik, Verwendung.

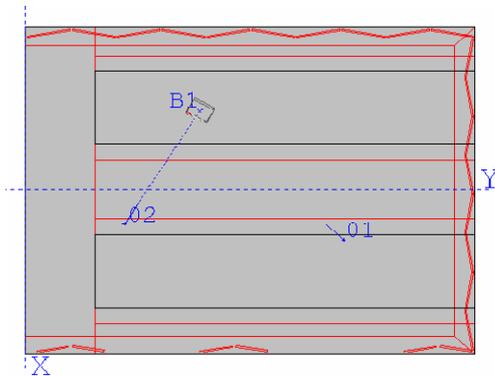


Abb. 40 Grundriss Tonstudio im Catt

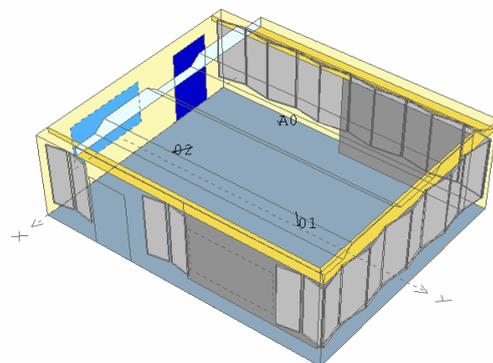


Abb. 41 Tonstudio in CATT-Acoustic

B1 stellt eine kugelförmige Schallquelle dar, wie sie für die Messungen mit *WinMLS* verwendet wurde. Die Mikrofonpositionen 01 und 02 repräsentieren, die Receiver in *CATT* bei der Simulation und Aufnahme mittels *WinMLS*. Entlang der roten Linie verläuft der Vorhang, die zu den drei Außenwänden parallel dargestellt ist. Die weiteren Linien innerhalb des Raumes deuten die Struktur der Decke an. Bis zum Zeitpunkt der Messung lag die Raumtemperatur bei 23°C und es war eine Luftfeuchtigkeit von 22%. Die Klimaanlage war abgeschaltet.

Mehrere akustische Messungen wurden durch die verschiedenen Bedingungen durchgeführt. Durch den Einsatz eines Vorhangs im Tonstudio ist die Akustik veränderbar. Diese Bedingung wurde berücksichtigt und für die Simulationen drei verschiedene Raumzustände definiert:

- Vorhang zu (VZ),
- Vorhang halb offen (VH)
- Vorhang offen (VO).

6.2.1 Ergebnisse der Nachhallzeiten im Tonstudio

In der folgenden Abbildung sind die Nachhallzeiten der CATT-Simulation des Tonstudios mit den entsprechenden Messwertgraphiken für die drei Raumzustände dargestellt.

Vorhang zu (VZ)

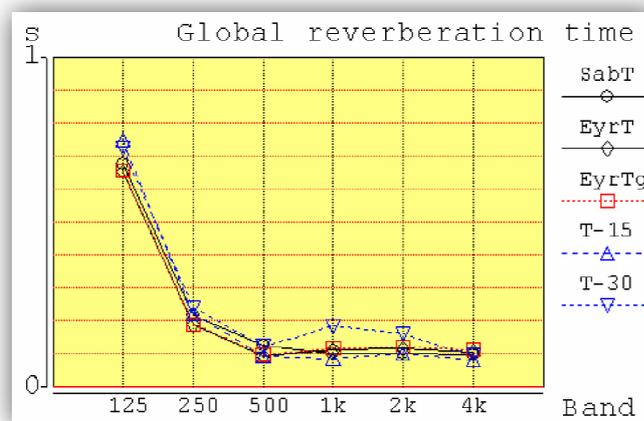


Abb. 42 Nachhallzeiten im Tonstudio CATT ; Raumzustand: VZ

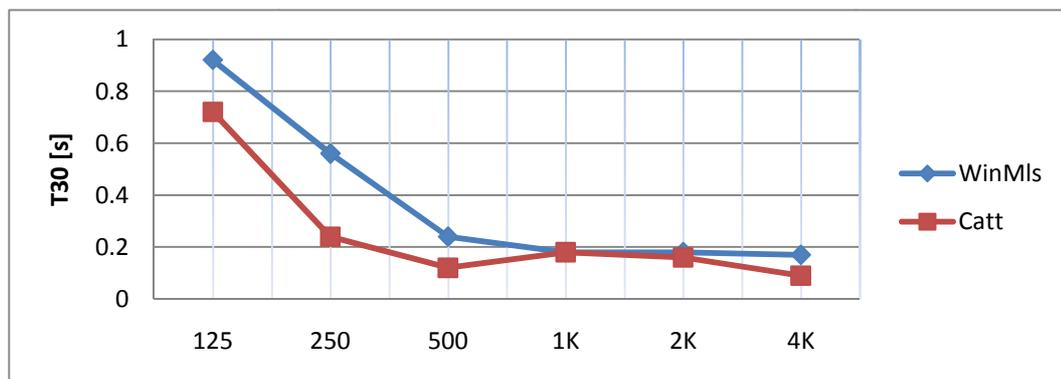


Abb. 43 Nachhallzeit im Tonstudio; Raumzustand: VZ WinMLS und in CATT

Man erkennt deutlich, dass in Abbildung *Abb. 43* Nachhallzeit im Tonstudio; Raumzustand: VZ WinMLS *und* in CATT zum ein Anstieg der Nachhallzeit bei 125 Hz zu beobachten ist. Die CATT-Kurve erreicht ähnliche Werte der realen Messung, doch fehlt ihr der Übergang bei 250 Hz, wo die WinMLS-Graphik bereits einen deutlichen Anstieg des im oberen Frequenzbereich linearen Verlaufes zeigt. Auch diese Linearität zwischen 500 und 4000 Hz ist in bei der CATT- Simulation nicht vorhanden.

Vorhang halb offen (VH)

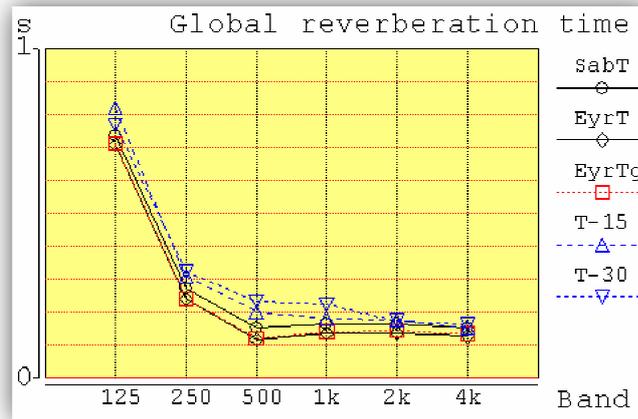


Abb. 44 Nachhallzeiten im Tonstudio Raumzustand: VH

In der Raumvariante mit halb geöffnetem Vorhang (VH) steigt die Nachhallzeit, bei wie erwartet höherer Frequenzbereiche, etwas an. Die Werte der CATT- Simulation, welche in folgende Abbildung *Abb. 45* dargestellt sind, erreichen hier eine gute Näherung an die realen Messergebnisse mit *WinMLS*. Bei den tiefen Frequenzen zwischen 125 und 250 Hz weichen die Werte nur ein wenig voneinander ab.

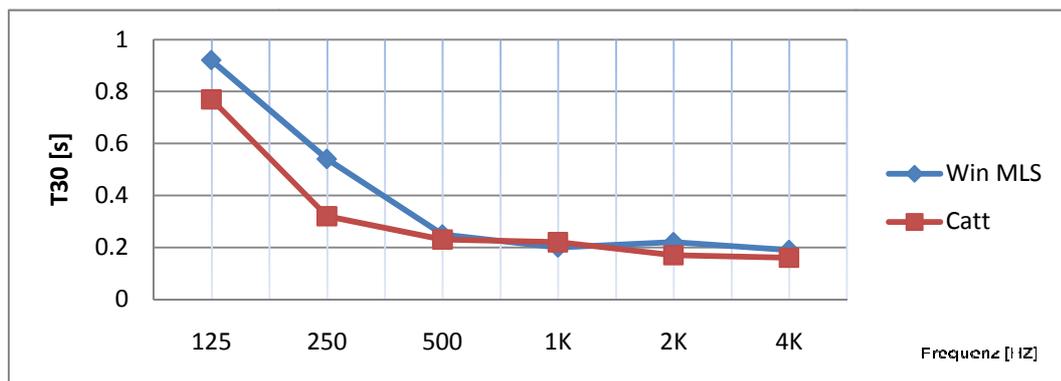


Abb. 45 Nachhallzeit im Tonstudio; Raumzustand: VH WinMLS und in CATT

Vorhang offen (VO).

In der dritten Raumvariante „Vorhang offen“ kommt es schließlich zu einem weiteren wesentlich deutlicheren Anstieg der Nachhallzeit im Frequenzbereich ab 500 Hz. Während, trotz fehlendem Vorhang die realen Messungen zeigen, dass auch jetzt noch die Nachhallzeiten des Aufnahme Raumes linear verlaufen, ermittelt *CATT-Acoustic* deutlich weniger Linearität. Möglicherweise sind die Absorptionswerte der nun ausschlaggebenden Flächen, wie Außenwände und Diffusoren, nicht optimal gewählt worden. Für unzureichende Einstellungen spricht auch die relativ große Abweichung von T_{30} zu der Nachhallzeit nach Sabine, die auftreten kann, wenn es an diffusen Reflexionen in der Simulation mangelt.

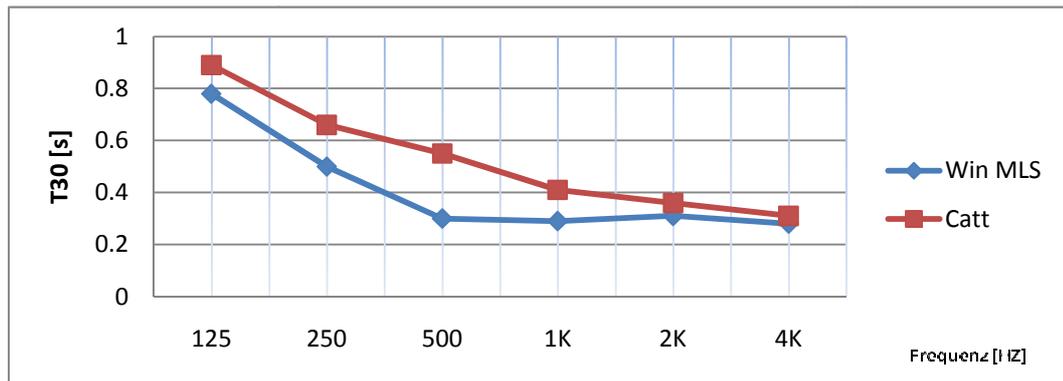


Abb. 46 Nachhallzeit im Tonstudio; Raumzustand: VO WinMLS und in CATT

Die folgende Tabelle stellt zu den Graphiken noch einmal die Zahlenwerte gegenüber:

T_{30} [s]	VZ		VH		VO	
F [Hz]	WinMLS	CATT	WinMLS	CATT	WinMLS	CATT
125	0,92	0,72	0,92	0,77	0,78	0,89
250	0,56	0,24	0,54	0,32	0,5	0,66
500	0,24	0,12	0,25	0,23	0,3	0,55
1K	0,18	0,18	0,2	0,22	0,29	0,41
2K	0,18	0,16	0,22	0,17	0,31	0,36
4K	0,17	0,09	0,19	0,16	0,28	0,31

Tab. 9 Nachhallzeiten im Tonstudio

Gütemaße im Tonstudio

D_{50} [%]	VZ		VH		VO	
F [Hz]	WinMLS	CATT	WinMLS	CATT	WinMLS	CATT
125	70,0	63,7	70,3	63,0	58,6	56,0
250	89,6	96,8	83,6	91,5	80,4	74,6
500	97,8	99,8	94,9	98,1	93,4	88,4
1K	99,0	99,9	98,0	98,4	94,2	88,1
2K	98,2	99,7	96,7	98,3	93,4	90,2
4K	98,9	99,9	97,6	99,1	92,6	93,8

Tab. 10 Deutlichkeitsmaß D_{50} [%] im Tonstudio

C_{80} [dB]	VZ		VH		VO	
F [Hz]	WinMLS	CATT	WinMLS	CATT	WinMLS	CATT
125	9,4	5,8	8,9	5,5	6,9	4,0
250	15,5	22,7	13,5	16,3	11,8	8,5
500	23,6	44,3	19,2	23,9	16,2	13,1
1K	29,1	43,9	25,5	25,3	18,2	13,3
2K	27,5	44,4	23,5	28,3	17,1	14,7
4K	29,0	45,2	24,6	31,1	18,3	17,6

Tab. 11 Klarheitsmaß C_{80} [dB] im Tonstudio

Der Vergleich der Werte des Klarheitsmaßes und Deutlichkeitsmaßes zeigt insgesamt eine zufrieden stellende Übereinstimmung. Beim Deutlichkeitsgrad D_{50} fallen die Werte von CATT-Acoustic meist etwas geringer aus, befinden sich aber in der Größenordnung der gemessenen Werte. Wenn man die verschiedenen

Raumzustände betrachtet, nimmt der Deutlichkeitsgrad mit zunehmenden Nachhallzeiten ab. Da in den ersten 50 ms durch zunehmenden Hallanteil die Energie relativ zur Gesamtenergie abnimmt, ist es eine Abnahme der Gütemaße im Laufe der Nachhallzeit zu erwarten. Sowohl CATT-Acoustic als auch WinMLS bestätigen dieses Verhalten. Entsprechend verhält sich das Klarheitsmaß C_{80} allerdings für den Raumzustand (VZ) ab 500Hz beginnen die Werte der Catt Acoustic zuzunehmen und weichen von der realen Werte. Die Richtigkeit dieser Werte wäre noch zu überprüfen.[2]

6.3 Hörsaal i2

Beim Hörsaal i2 handelt es sich um einen Raum, der über 100 Plätze verfügt und für Vorlesungen am Institut für Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung Breitbandkommunikation genutzt wird. Die sieben Sitzreihen steigen nach hinten stufenweise an.

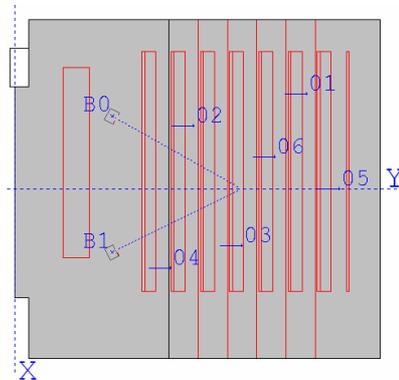


Abb. 47 Grundriss Hörsaal i2

In der Abbildung sind wieder zwei Quellen im vorderen Bereich (B0, B1) und die Mikrofone (01-06) in den Hörerbänken verteilt dargestellt. Die roten Linien stellen das Pult, die Sitzbänke und die Stufen dar. Zu dem Zeitpunkt der Messung mit WinMLS betrug die Temperatur 23°C und die Luftfeuchtigkeit 24 die Klimaanlage wurde nicht abgeschaltet.



Abb. 48 Hörsaal i2 CATT-Acoustic/ Foto nach Sanierung 05/20011

Der Hörsaal i2 besitzt einen größeren Raumvolumen, als der Saal der FCG und Tonstudio. Er verfügt nicht eine durchgehende Grundfläche wie die andere Räume, sondern steigt mit jeder Sitzreihe stufenweise an.

6.3.1 Ergebnisse der Simulation im HsI2

Nachhallzeit T30

Die folgende Abbildung stellen die Messungen der Nachhallzeit in Catt und WinMLS dar.

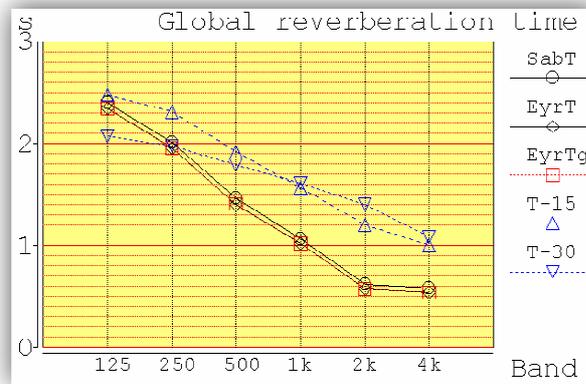


Abb. 49 Nachhallzeiten Hörsaal i2 (CATT)

In der nächsten Abbildung sind beide Graphiken auf den ersten Blick eindeutig nicht identisch. Wenn man bewusst nur die jeweiligen T_{30} -Kurven betrachtet, fallen diese Unterschiede auf. Besonders in den Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 250 Hz sowie 2 kHz und 4 kHz werden Abweichungen von bis zu 0,45 s deutlich.

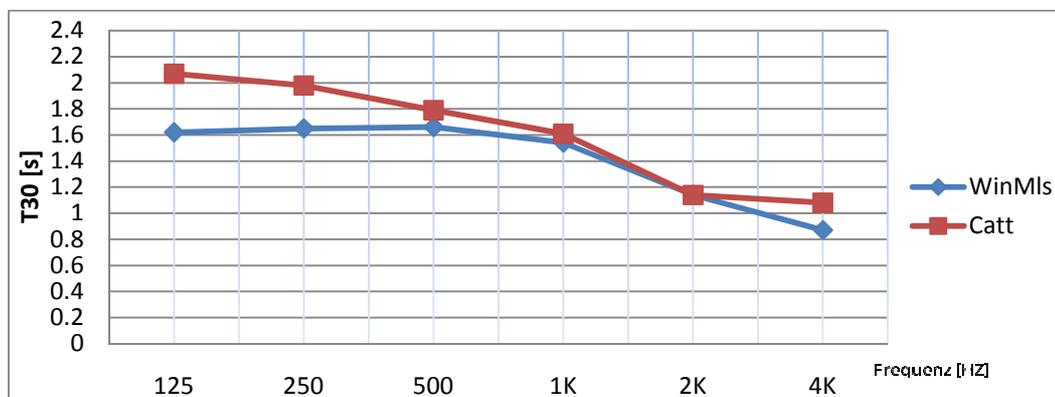


Abb. 50 Vergleich der Nachhallzeit Hörsaal i2 (WinMLS/Catt)

Diese Abweichungen sind zu erwarten, wenn man allerdings bedenkt, dass die Absorptionskoeffizienten sowohl der Deckenverkleidung als auch deren Rückseiten nur geschätzt werden konnten. Außerdem war die genaue Raumhöhe nicht bekannt. Allerdings stellen die virtuellen Messergebnisse mit Catt eine gute Näherung an die Wirklichkeit dar. Die Messergebnisse können in der folgenden Tabelle verglichen werden:

F[Hz]	125	250	500	1K	2K	4K
WinMLS	1,62	1,65	1,66	1,54	1,14	0,87
CATT	2,07	1,98	1,79	1,61	1,14	1,08

Tab. 12 Nachhallzeit in HS i2

Gütemaße in HS i2

Bei der Messung der Gütemaße sowie bei der Messung der Nachhallzeit liefert die Prognose von *Catt-Acoustic* trotz der nur unzureichenden Definition vieler Oberflächen bezüglich ihrer akustischen Eigenschaften, ähnliche Ergebnisse. Beim Deutlichkeitsgrad sind sich beide Programme einig, dass die für eine gute Verständlichkeit definierte Grenze von 50% in den Oktavbändern von 250 Hz bis 1 kHz nicht erreicht wird. Oberhalb dieser Frequenzen liefern beide Softwarepakete ähnliche und zum Glück für einen Hörsaal auch bessere Werte. Beim Klarheitsmaß können im oberen Frequenzbereich bessere Übereinstimmungen als im unteren festgestellt werden. In folgende Tabelle sind die realen Werte sowie Simulationswerten der Gütemaße D_{50} bzw. C_{80} zu finden:

F[Hz]	125	250	500	1K	2K	4K
D_{50}[%]						
WinMLS	56,6	29,0	38,4	34,9	50,3	64,3
CATT	22,7	24,9	36,6	42,1	58,5	62,5
C_{80}[dB]						
WinMLS	3,9	-0,9	0,4	0,4	3,0	6,4
CATT	-3	-2,4	-0,7	1,2	4,5	5,2

Tab. 13 Gütemaße in HS i2

6.4 Zusammenfassung

Der Saal der FCG schneidet in der Simulation mit *CATT-Acoustic* im Vergleich mit den anderen Räumen zunächst am schlechtesten ab. Bei der Simulation des Saales treten doch Unterschiede zu realen Messungen auf, die nicht mehr so klein anzusehen sind (wie z.B. beim Tonstudio) vor allem beim der Bewertung des Klarheitsmaßes. Die Simulation eines Raumes mit großen Flächen gleicher akustischer Eigenschaften hat den Nachteil, dass sich Fehler in der Definition der akustischen Parameter dieser Flächen schnell sehr nachteilig auf das Gesamtergebnis auswirken können. Eine Fehlerquelle stellen sicher die Absorptionswerte der Oberflächen dar. Die genaue Information über die Materialien und ihre Absorptionsgrades wurde angenommen.

Beim Tonstudio liefert insgesamt *CATT-Acoustic* Werte, die sich in der realen Messung bestätigen. Die Werte sind nicht präzise, allerdings liefern die Ergebnisse der Simulation eine zufriedenstellende Näherung. Entscheidend an diesem überzeugenden Ergebnis beteiligt ist sicher die Tatsache, dass das Tonstudio aufgrund sehr genauen Wissens über die akustische Eigenschaft der verschiedenen Oberflächen sehr genau in *CATT-Acoustic* modelliert werden konnte. Der Hörsaal i2

schneidet in der Simulation mit *CATT-Acoustic* auch zufriedene Ergebnisse ab. Bei dieser Simulation sind die größten Unsicherheiten so wie beim Saal der FCG aufgrund des Mangels genaue Definition der Absorptionskoeffizienten. Die genauen Informationen über den Zustand der Deckenverkleidung und andere Oberflächen sind nicht genau angeben trotzdem kommt *CATT-Acoustic* zu akzeptablen Werten. Schlussendlich um ein Modell mittels Catt-Acoustic richtig zu simulieren, welche ausreichende akustische Werte liefert, ist es notwendig so viel Information wie möglich über einen bestimmten Raumes zu haben. Entscheidend für die Richtigkeit einer akustischen Prognose, ist die genaue Kenntnis der Absorptionskoeffizienten aller Oberflächen in einem Raum. Nur dann kann man eine erfolgreiche Optimierung der Akustik gewährleisten.[2]

7 Der raumakustische Planungsprozess

Der heutige Wissensstand auf dem Gebiet der Raumakustik und die verfügbaren Planungsinstrumentarien ermöglichen die Festlegung von raumakustischen Maßnahmen im Planungsprozess sowie eine detaillierte raumakustische Planung. Immer noch beeinflussen subjektive und emotionale Faktoren die Beurteilung der raumakustischen Eigenschaften eines Saales — vor allem bei der Musik— maßgeblich. Bei einem erfolgreichen raumakustischen Planungsprozess kann man jedoch keinesfalls von einem glücklichen Zufall sprechen. Da Musik (Schall) von den Menschen subjektiv unterschiedlich empfunden wird, gibt es verschiedenste Meinungen zur Raumakustik. Dies wiederum führt zu differenzierten Bewertungen und Aussagen. Über mehrere Jahrzehnte hinweg waren Forschungsarbeiten darauf ausgerichtet, alle subjektiven Faktoren und Qualitätsurteile zusammenzufassen und diese auszuwerten, um objektivere Kriterien für die Raumakustik zu erhalten. In der Raumakustik werden diese objektiven Kriterien Gütemaße genannt.

Das Ziel der raumakustischen Planung ist es, ein akustisches Optimum zu erreichen. Das Optimum ist von den Gütemaßen abhängig. Diese Optimalwerte sind von der Funktion des Raumes abhängig. So sind in einem Konzertsaal für sinfonische Musik beispielsweise andere Kriterien von Bedeutung als in einem Hörsaal.

Eine Prognose der subjektiven und raumakustischen Eigenschaften erfolgt heute meist auf der Grundlage von Computersimulationen sowie mittels Messungen an physikalischen Räumen oder Modellen.

Heutzutage ist es möglich, praktisch jede Grundform eines Raumes akustisch funktionsfähig zu machen. Diese Grundform wird **Primärstruktur** genannt und beschreibt die Geometrie und das Volumen eines Raumes, sowie zu gewissem Grad die Topographie der Zuschauer und der Bühnenflächen (z.B.: beim Theater oder bei Auditorien).

Die Auswahl geeigneter Maßnahmen für Saalausbau und Oberflächengestaltung wird **Sekundärstruktur** genannt und ist für die Innengeometrie, Design der Wand und der Deckenaufbaute sowie deren akustischer Wirksamkeit zuständig. Je mehr die Primärstruktur von der optimalen akustischen Gestaltung abweicht, desto größer werden der Aufwand und die Kosten für die sekundären Maßnahmen sein. Aus diesem Grund ist bei größeren Projekten eine exakte akustische Planung notwendig. In der Planungsphase gilt es problematische Lösungsformen zu vermeiden. Als problematisch werden beispielsweise seitlich fehlende Reflexionen, tiefe Ränge unter denen es Platzbereiche gibt, die nur schlecht mit Schall versorgt werden können, oder konkave Raumformen, die zu einer unerwünscht starken Schallfokussierung gegenüber dem Direktschall führen können, eingestuft. Jedoch gibt es, zumindest für größere Auditorien, keine standardisierte optimale Grundform. Unter der Leitung von Architekten und in Zusammenarbeit mit Fachplanern ist eine Optimallösung, die allen raumakustischen und architektonischen Aspekten entspricht, anzustreben. Bei kleinen Räumen, insbesondere für Sprachkommunikation, lässt sich dazu mittels graphischer und

rechnerischer Verfahren die geeignete Primär- und Sekundärstruktur eines Raumes festlegen. Zur Planung größerer Auditorien, mit der Hauptanwendung Musik, werden Modellmethoden und Computersimulation empfohlen. Mittels rechnerischer Verfahren kann in Räume, die noch nicht existieren, durch ein Computermodell, hineingehört werden. Auf diese Weise kann prognostiziert werden, ob das zu erwartende optimale Hörerlebnis zustande kommen kann. Wenn dies nicht der Fall ist, können noch während der Planungsphase Maßnahmen für Primär- und Sekundärstruktur berücksichtigt werden. Eine raumakustische Sanierung ist zumeist nur über sekundäre Maßnahmen zur Verbesserung der Raumakustik möglich.[6][8][10]

7.1 Ablauf der Raumakustischen Planung

Um die Primär- und Sekundärstruktur eines Raumes im Planungs- oder Sanierungsprozess besser anzupassen, ist es nötig, mehrere Kriterien zu berücksichtigen:

- Statische Raumakustik
- Geometrische Raumakustik

7.1.1 Kriterien der Statischen Raumakustik:

Die Theorie der statischen Raumakustik beschreibt produktive sowie kontraproduktive Reflexionen, die anzustreben sind, Wird ein Schallstrahl über längere Zeit verfolgt, so wird er vielfach reflektiert und es kommt an jedem Raumpunkt zu einer Vielzahl von Überlagerungen von Einzelstrahlen, die mathematisch nicht mehr nachvollziehbar sind. In diesem Fall wird von einem Schallfeld gesprochen. Aus der Energiebilanz zwischen Absorber (Energie-Verbraucher) und Schallquelle (Energiequelle) ergeben sich An- und Abklingvorgänge. Hier spielt die geometrische Form eines Raumes keine Rolle. Die relevanten Größen in der statischen Raumakustik sind das Raumvolumen V , die Oberfläche S , der Schallabsorptionsgrad α und die Nachhallzeit T . Die Nachhallzeit ist heute noch eine der relevantesten Gütemaße in der Raumakustik. Sie ist das älteste akustische Merkmal, das über eine lange Zeit als einzige Zielgröße der raumakustischen Planung zur Verfügung stand. Graphische und rechnerische Verfahren der Nachhallzeit sowie andere Gütemaße werden in den folgenden Abschnitten eingehender, auch anhand von Anwendungsbeispielen, erläutert.

7.1.1.1 Optimale Werte der Volumenkenzahl

Wegen der unvermeidlichen Absorption durch Personen und Raumbegrenzungsflächen kann man Grenzen für die Volumenkenzahlen K [m^3 / Platz] von Räumen für bestimmte Nutzungen angeben. Die Optimalwerte der Volumenkenzahl als Funktion der Nutzungsart werden in der nachfolgenden Tabelle angeführt.

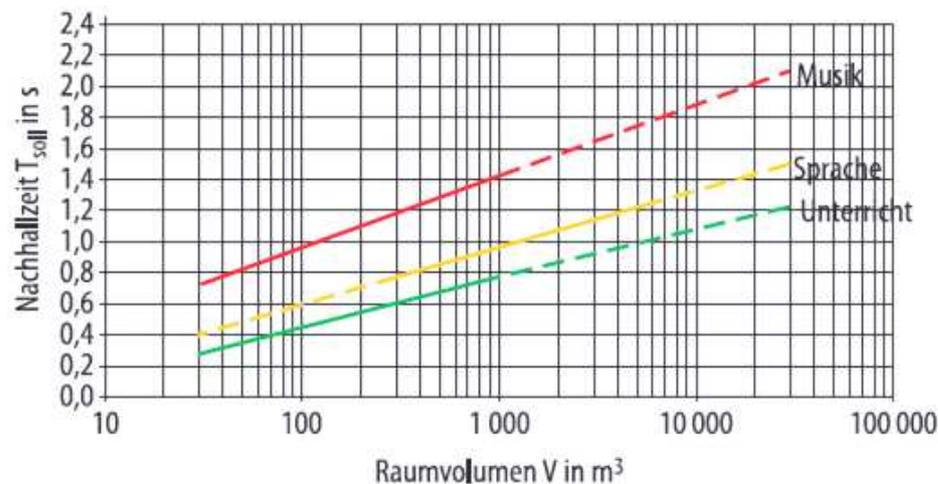
Hauptnutzung des Raumes	Volumenkennzahl K [m ³ /platz]
Sprache	3-6
Gemischt	5-8
Musik	7-12

Tab. 14 Volumenkennzahl als Funktion der Nutzungsart nach [DIN18041,S.12]

Die Volumenkennzahl beschreibt den Schalldruckpegel in einem Raum. Ist K zu groß, sind zur Verkürzung der Nachhallzeit zusätzliche Absorptionsmaßnahmen erforderlich. Ist die Volumenkennzahl zu niedrig, kann kein ausreichender Schalldruckpegel mehr erzielt werden und Beschallungsanlagen werden notwendig. **iError! No se encuentra el origen de la referencia.iError! No se encuentra el origen de la referencia.**

7.1.1.2 Optimale Nachhallzeit nach DIN 18041

Für kleine bis mittelgroße Räume lässt sich in DIN 18041 „Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen“ die optimale Nachhallzeit T_{soll} für die unterschiedliche Nutzungsart in Abhängigkeit des Raumvolumens graphisch sowie numerisch bestimmen.

Abb. 51 Sollwert T_{soll} der gemittelten Nachhallzeit für unterschiedliche Nutzungsarten (iError! No se encuentra el origen de la referencia. S.14)

Bei Mehrzwecknutzung sind entsprechend der Wertigkeit der einzelnen Nutzungsarten Zwischenwerte zwischen den Sollkurven zu ermitteln. Die volumenabhängige optimale Nachhallzeit lässt sich auch numerisch nach folgenden Formeln ermitteln: (iError! No se encuentra el origen de la referencia.S.14)

$$\begin{aligned}
 \text{Musik: } T_{soll} &= \left(0,45 \lg \frac{V}{\text{m}^3} + 0,07 \right) \text{ s für } 30 \text{ m}^3 \leq V \leq 30\,000 \text{ m}^3 \\
 \text{Sprache: } T_{soll} &= \left(0,37 \lg \frac{V}{\text{m}^3} - 0,14 \right) \text{ s für } 30 \text{ m}^3 \leq V \leq 30\,000 \text{ m}^3 \\
 \text{Unterricht: } T_{soll} &= \left(0,32 \lg \frac{V}{\text{m}^3} - 0,17 \right) \text{ s für } 30 \text{ m}^3 \leq V \leq 30\,000 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

In den folgenden Abbildungen werden die Toleranzbereiche der empfohlenen Nachhallzeit in Abhängigkeit der Frequenz für Sprache und Musik dargestellt:

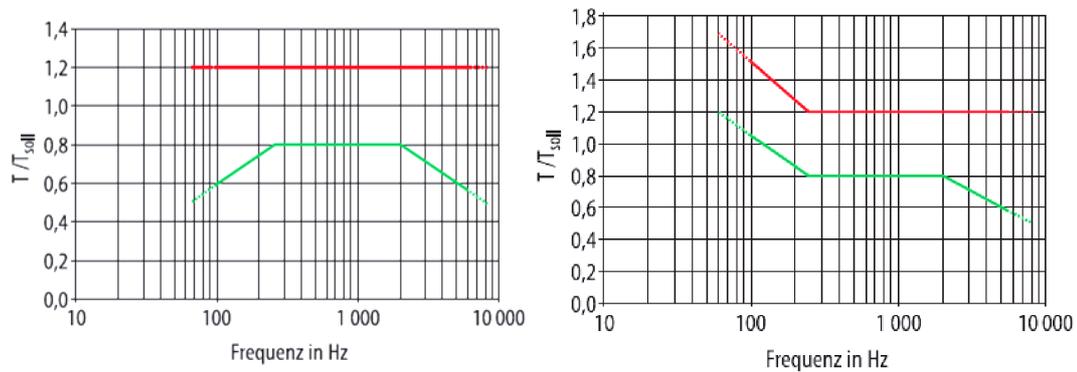


Abb. 52 Toleranz Bereiche der empfohlene Nachhallzeit für Sprache (links) und Musik (rechts) in Abhängigkeit der Frequenz nach Din 18041[4] S.15

Liegt die Nachhallzeit des betrachteten Raumes außerhalb des Toleranzbereichs, so werden die Kriterien der optimalen Nachhallzeit nach DIN 18041 nicht erfüllt. Der Frequenzverlauf der Nachhallzeit sollte linear sein und sollte keine "Ausreißer" in einzelnen Frequenzbereichen beinhalten. Entsteht eine Überhöhung von einzelnen tiefen Frequenzen, könnte es sich um stehende Wellen handeln, welche sich in den tiefen Frequenzen zwischen zwei reflektierenden Wänden bilden können.

7.1.2 Kriterien der geometrischen Raumakustik

Für die akustische Qualität in einem Raum ist neben der Raumgröße die Raumform von entscheidender Bedeutung. Ziel der geometrischen Raumakustik ist die ausreichende Versorgung der Zuhörer mit Direktschall und Anfangsreflexionen.

7.1.2.1 Nützliche Anfangsreflexionen für Sprache und Musik

Eine Unterstützung des Direktschalles mit nützlichen Anfangsreflexionen kann mit bestimmten Raumboflächen erreicht werden. Die Plätze in der Saalmitte und vor allem im hinteren Bereich sind mit Direktschall normalerweise schlecht versorgt. Die Lenkung der Reflexionen soll innerhalb von 50 ms nach dem Direktschall eintreffen, um diese Plätze mit Direktschall besser zu versorgen. In anderen Worten bedeutet das, dass die Laufwege dieser Reflexionen maximal etwa 17 m länger sein dürfen als der Direktschallweg. Das ist die Grenze für störende Reflexionen bei Sprache, bei Wegunterschieden zweier Schallsignale von mehr als 34 m bzw. 100 ms (Siehe Abb. 53 /Abb. 54) sind Echos zu erwarten. Mit Hilfe von nützlichen Anfangsreflexionen soll der Direktschall die Zuhörer ohne Störungen erreichen.

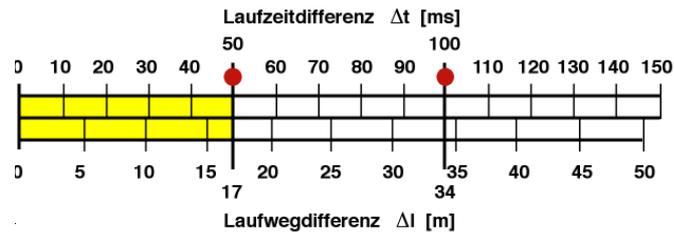


Abb. 53 Verwischungsschwelle für Sprache

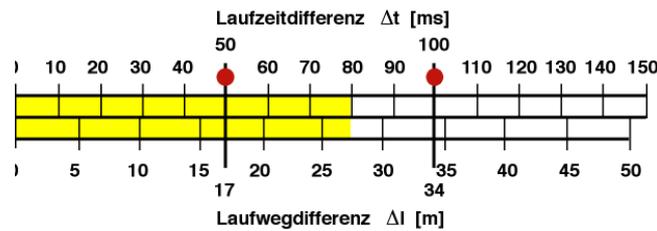


Abb. 54 Verwischungsschwelle für Musik

7.1.2.2 Lenkung des Schalls

Um eine Verbesserung der Direktschallversorgung und auch bessere Sichtverhältnisse zu erreichen, kann bei größeren Räumen der Ausbau einer Sitzreihenüberhöhung und eventuell eines Podiums von Vorteil sein.

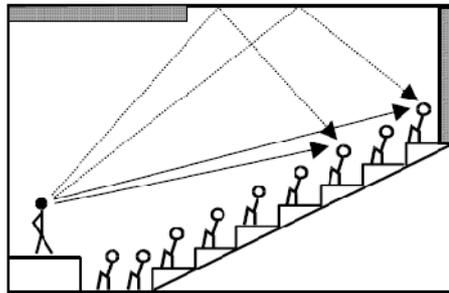


Abb. 55 Direkter und indirekter Schall bei einer Sitzreihenüberhöhung[8]

7.1.2.3 Reflektoren und Absorber

Der Aufbau von schallharten Flächen (Reflektoren) ermöglicht die Lenkung von Reflexionen in Gebiete, die vom Direktschall schlecht versorgt sind. Die Anordnung der Reflexionsflächen kann man auf grafischem Weg bestimmen, indem man die Schallstrahlen, die von der Schallquelle ausgehen, verfolgt. Wenn der Laufwegunterschied zwischen direktem und reflektiertem Schall zu groß ist, dann sind die Reflektoren bzw. Absorber auf andere Winkel zu richten.

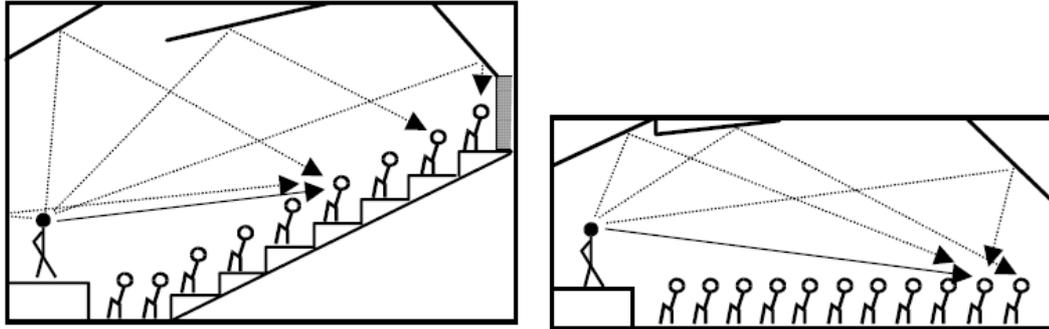


Abb. 56 Anordnungsbeispiele von Reflektoren in Vortragsräumen; [Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#)

Flatterecho, welche durch das Hin- und Herpendeln der Schallenergie zwischen zwei parallelen Flächen entsteht, ist zu vermeiden. Das sogenannte Flatterecho wird als störende Reflexion wahrgenommen, kann jedoch durch einfache Maßnahmen umgangen werden. In der folgenden Abbildung sind diese Maßnahmen dargestellt.

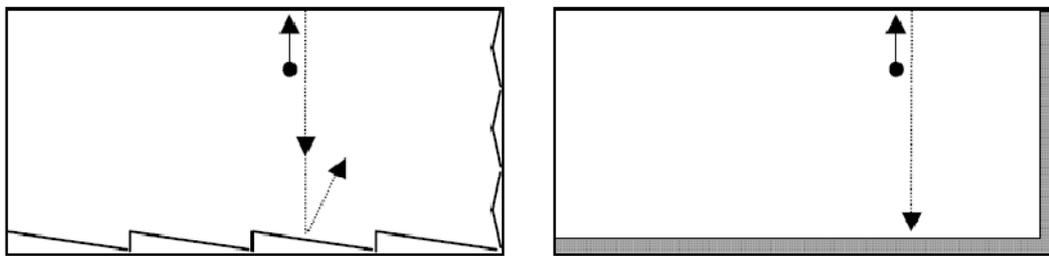


Abb. 57 Maßnahmen gegen Flatterechoerscheinungen; [Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#), S.159

Durch die Schrägstellung einer Wand um einen Winkel $\geq 5^\circ$ oder durch die Ausführung von zwei Wänden mit breitbandig wirksamer Schallabsorption kann das Flatterecho vermieden werden.

Eine Änderung der Höhe und Neigung der aufgehängten Decke ist möglich. Wie die folgende Abbildung zeigt, ist eine Veränderung der Decke bezüglich der Lenkung von Anfangsreflexionen von Vorteil.

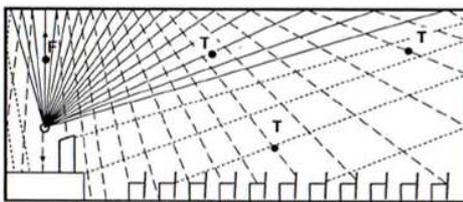


Abb. 58 Deckenreflexionen im Längsschnitt bei ebener Decke

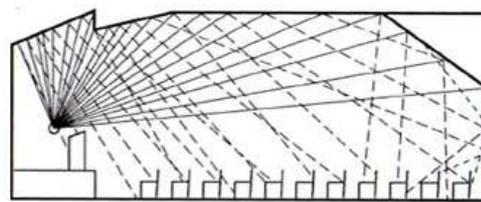


Abb. 59 Deckenreflexionen im Längsschnitt nach Optimierung der Deckenform

F...Flatterecho T... Theaterecho
 Direktschallfächer: ausgezogene Linien
 Erste Reflexionen: gestrichelte Linien
 Zweite Reflexionen: punktierte Linien

Im ersten Längsschnitt mit einer ebenen Decke lässt sich gut erkennen wie die Dichte der ersten Reflexionen nach hinten abnimmt. Einige der zweiten Reflexionen treffen bei ebener Decke über Decke und Rückwand wegen ihres großen Laufweges im vorderen Saalbereich stark verzögert zum Direktschall ein. Sind die

Wegdifferenzen zweier Schallstrahlen größer als 50 ms so ergibt sich eine Verschlechterung der Sprache. Dieser Effekt wird als „Theaterecho T“ bezeichnet. Er ist typisch für größere Räume und tritt bei einer Wegdifferenz von 50[m] bzw. 75ms auf. Im zweiten Fall verursacht die günstigere Deckenneigung eine verstärkte Reflexionslenkung in mittleren und hinteren benachteiligten Sitzplätzen.

Bei geneigter Decke im vorderen Bereich werden die zweiten Reflexionen entweder durch Absorption des Publikums vermieden oder sie treffen im hinteren Saalbereich kurzzeitig nach dem Direktschall ein. Die geneigte Decke hilft zweite Reflexionen zu umgehen und den Deutlichkeitsgrad im hinteren Saalbereich zu erhöhen. Eine in horizontale bzw. vertikale Richtung schräggestellte Rückwand kann dazu beitragen, sowohl das Theaterecho als auch das Flatterecho (siehe Abb. 57 und Abb. 59) zu verhindern.

Mit Hilfe einer Schrägstellung der Seitenwände in horizontaler bzw. vertikaler Richtung kann Einfluss auf die akustischen Eigenschaften eines Saales genommen werden. Wie Abb. 60 zeigt, lenken nach außen (links) geneigte Wandflächen die Reflexionen von der Publikumsfläche weg, nach innen geneigten Flächen zu dieser hin. Im ersten Fall entsteht auch durch die Vergrößerung des Raumvolumens eine Verlängerung der Nachhallzeit, im zweiten Fall bewirkt dies eine Verkürzung der Nachhallzeit. Die Nachhallzeitverlängerung gilt nur, wenn die Decke auch als reflektierende Fläche wirkt.



Abb. 60 Verlängerung (links) und Verkürzung(rechts) der Nachhallzeit durch schräge Wandflächen(**Error! No se encuentra el origen de la referencia.** S.169)

7.1.2.4 Fokussierung der ersten Reflexionen

Bei konkav gekrümmten Flächen entsteht die Gefahr, dass es zu störenden Schallkonzentrationen kommt, deswegen sollten diese vermieden werden. Der Grundriss des Raumes sollte so geplant werden, dass der Konzentrationspunkt der Schallenergie außerhalb des Saales liegt. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

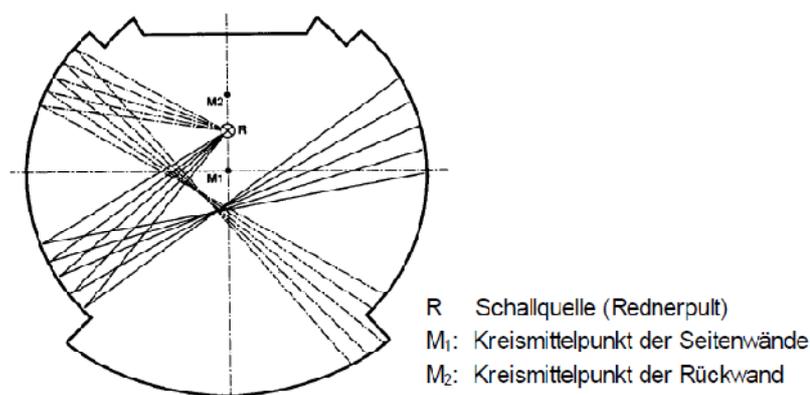


Abb. 61 Fokussierung der ersten Reflexionen im Kreisraum

Liegt eine Fokussierung der Schallenergie im Publikumsbereich, kann diese zu einer ungleichmäßigen Schallversorgung führen. Ist die Zeitdifferenz der Reflexionen zum Direktschall höher als 50 ms, bewirkt sie eine Verminderung der Verständlichkeit der Sprache. Eine Fokussierung der Reflexionen kann z.B. durch Absorptionsflächen, diffus reflektierter Strukturen, oder sinnvoller Reflexionslenkung verhindert werden.

8 Der praktische Ablauf des raumakustischen Planungsprozesses

Der folgende Abschnitt stellt mit Hilfe eines groben Leitfadens einen praktischen Ablauf für einen erfolgreichen raumakustischen Planungsprozess dar. Ziel dieses Leitfadens ist, die Anforderungen im Sinne dieser oben genannten objektiven Kriterien genau zu definieren und die Maßnahmen zur Verbesserung der raumakustischen Situation vorzustellen. Wie bereits erwähnt, ist die Anpassung der Primär- und Sekundärstruktur eines Raumes von mehreren objektiven Kriterien abhängig (siehe Kapitel 7).

8.1 Akustische Optimierung für den Versammlungsraum der FCG

Die raumakustische Planung des Versammlungsraumes der FCG lässt sich anhand des folgenden Leitfadens darstellen: (Graber, [10]S.173)

1. Position innerhalb des Gebäudes bestimmen

Die Position des Saales ist bereits festgelegt. Wie in *Kapitel 2* erwähnt, wurde nach verschiedenen Überlegungen und mehreren Gesprächen mit einem Beamten des Bauamts Graz sowie einem Architekten festgestellt, dass ein Umbau des Saales nicht erlaubt ist.

2. Verwendungszweck des Raumes und die Art der Darbietung

Der Verwendungszweck des Saales ist die Musik und Sprache.

3. Zahl der notwendigen Zuhörerplätze

Der Saal ist mit 120 Sitzplätzen ausgestattet.

4. Günstiges Raumvolumen bestimmen

Da die Hauptnutzung des Saales gemischt ist, liegt die vorgeschlagene Volumenkenzahl nach *Tab. 14* **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** zwischen 5-8 m³/ Platz. Das Raumvolumen für 120 Sitzplätze sollte zwischen 600 und 960 m³ liegen. Mit einem Raumvolumen von 550,85 m³ liegt der Saal unterhalb des Sollbereichs.

5. Geometrische Formgebung der Begrenzungsflächen

Grundfläche: Direktschallwege zwischen Schallquelle und Zuhörer kurz halten.

Der Saal der FCG besitzt bereits eine vorteilhafte Grundfläche im Bereich des Podiums. Seine schrägen glatten Wände mit einer Neigung von 36,5° erlauben eine Verstärkung der Reflexionslenkung.

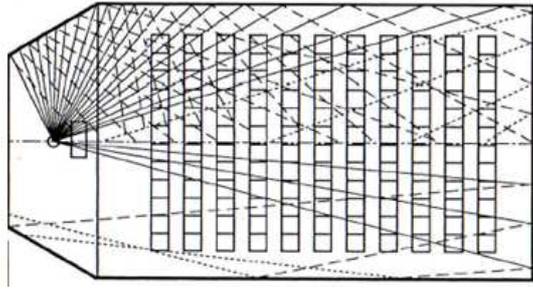


Abb. 62 Seitenwandreflexionen obere Saalfläche Rückwandreflexionen
(untere Saalhälfte) im Grundriss[6] (S.158)

Direktschallfächer: ausgezogene Linien
Erste Reflexionen: gestrichelte Linien
Zweite Reflexionen: gepunktete Linien

- Mittlere Deckenhöhe:

Die mittlere Deckenhöhe ergibt sich aus dem Verhältnis von Volumen ($550,85 \text{ m}^3$) und Grundfläche ($134,23 \text{ m}^2$). Diese sollte die $7,0 \text{ m}$ nicht überschreiten²³. Der Saal besitzt bereits $4,40 \text{ m}$ Höhe und oberhalb der aufgehängten Decke stehen noch weitere $1,6 \text{ m}$ Lichthöhe bis zum Dach Oberkante zur Verfügung.

- Formgebung der Decke:

Konvexe Flächen vermeiden, nützliche Reflexionsflächen schaffen

- Reflexionsschallversorgung durch Teilflächengliederung

Für die Seitenwände des vorderen Saalabschnittes sind zum Publikum geneigte Reflektoren von Vorteil. Dadurch wird ein Flatterecho vermieden und nützliche Reflexionen verstärkt. Mittels Dreieckstrukturen als Teilflächengliederungen ist es möglich die optimale Schalllenkung im mittleren und hinteren Saalbereich zu erreichen. Die Neigung dieser Seitenreflektoren muss mindestens größer als 5° sein.

- Formgebung der Wände, Parallelen möglichst vermeiden

Für die akustische Planung ist eine Parallelität der Seitenwände aufgrund des Flatterechos möglichst zu vermeiden. (Siehe Abb. 57) Für den Saal der FCG sind die Änderungen in der Primärstruktur nicht mehr möglich. Änderungen der Seitenwände sind nur mit Einführung von Absorber bzw. Reflektoren in der Sekundärstruktur möglich.

²³ mit einem max. Raumvolumen von 960 m^3

6. Bestimmung der optimalen Nachhallzeit

$$\text{Musik: } T_{\text{soll}} = \left(0,45 \lg \frac{V}{\text{m}^3} + 0,07 \right)$$

$$\text{Sprache: } T_{\text{soll}} = \left(0,37 \lg \frac{V}{\text{m}^3} - 0,14 \right)$$

Glg. 6

Bei einem Raumvolumen von mindestens $V=600 \text{ m}^3$ sollte die optimale Nachhallzeit 1,25 s für Musik und 1,0 s für Sprache betragen.

7. Bestimmung der erforderlichen Absorptionsflächen zum Erreichen der optimalen Nachhallzeit

Im Saal ist bereits eine akustische Decke eingebaut, die einen hohen Absorptionskoeffizient besitzt. Die Decke absorbiert um 27% alle Frequenzen und vermindert die Nachhallzeit. Damit die optimale Nachhallzeit erreicht wird, muss die Nachhallzeit des Saales erhöht werden. Der Einsatz weiterer Absorptionsflächen könnte im Prinzip unerwünschte zweite Reflexionen wie Flatterecho verhindern, allerdings auf Kosten der optimalen Nachhallzeit. Die aktuelle Nachhallzeit im Saal mittels *WinMLS* akustischer Messung beträgt 0,73 s bei 1000 Hz *Tab. 6* Nachhallzeit in *WinMLS* und in *Catt*. Der Sabin`schen Formel bei 1000 Hz liegt die Nachhallzeit bei 0,7 s und bestätigt die reale Werte der Messung.

Berechnung der Nachhallzeit					
Beispielraum (Quader)		Fenster		Nachhallzeit T	
Höhe	<input type="text" value="4,40"/> m	Anzahl	<input type="text" value="5"/> Stück	0,163 * (V / A)	
Breite	<input type="text" value="7,40"/> m	Höhe	<input type="text" value="2,00"/> m	<input type="text" value="0,7"/> sec	
Tiefe	<input type="text" value="16,77"/> m	Breite	<input type="text" value="1,30"/> m	bei Frequenz <input type="text" value="1000"/> Hz	
Volumen	546,03 m ³				
Stellwände		Sichtblenden		Akustiksegel	
Anzahl	<input type="text" value="0"/> Stück	Anzahl	<input type="text" value="0"/> Stück	Anzahl	<input type="text" value="0"/> Stück
Höhe	<input type="text" value="0,00"/> m	Höhe	<input type="text" value="0,00"/> m	Breite	<input type="text" value="0,00"/> m
Breite	<input type="text" value="0,00"/> m	Breite	<input type="text" value="0,00"/> m	Tiefe	<input type="text" value="0,00"/> m
Flächen + Materialien				äquivalente Schallabsorptionsfläche	
				= Fläche * α_s	
				Frequenz <input type="text" value="1000"/> Hz	
				α_s äquival. Fläche m ²	
Decke	Akustikdecke gut	124,10 m ²	0,90	111,6882	26,93%
Fenster	Fensterglas	13,00 m ²	0,05	0,6500	2,82%
Wände	Putz	199,70 m ²	0,04	7,9878	43,33%
Stellwand	nicht definiert	0,00 m ²	0,00	0,0000	0,00%
Sichtblenden	nicht definiert	0,00 m ²	0,00	0,0000	0,00%
Akustiksegel	nicht definiert	0,00 m ²	0,00	0,0000	0,00%
Boden	Beton	124,10 m ²	0,04	4,9639	26,93%
Summe		460,89 m²	Summe	125,2899	100,00%

Abb. 63 Berechnung der Nachhallzeit nach Sabine²⁴ [13]

²⁴ Berechnung der Nachhallzeit mittel Excel- Tool der Firma Preform GmbH [13]

8. Ausreichende Schalldämmung der Umfassungsbauteile zur Vermeidung von Störgeräuschen von außen

- Verkehrsgeräusche
- Lärm aus angrenzenden Räumen

Eine Messung des Geräuschpegels bauseitiger Geräusche wurde nicht durchgeführt, da der Saal im Hinterhof liegt und an keine anderen Räume grenzt. Bauakustische Maßnahmen sind nicht notwendig.

9. Vermeidung von Störgeräuschen durch lärmarme Ausführung von:

- Aufzügen
- Lüftungsanlage
- Beleuchtungsanlagen
- Bühnenrichtungen

Im Saal werden jeden Sonntag während des Gottesdienstes die Lüftungsanlage sowie ein Beamer, der 4,20 m über der Fußbodenoberkante liegt, eingeschaltet. Beide stellen die Hauptverursacher von Betriebsgeräuschen dar. Allerdings werden diese nicht wirklich als störend empfunden. Das regelbare Zu- und Abluft-System sowie der Beamer sind neu und beaufschlagen einen niedrigen Störgeräuschpegel. Aus diesem Grund sind keine Maßnahmen für den Saal geplant.

10. Vermeidung von Störgeräuschen durch das Publikum

- Lärmarme Bestuhlung
- Geräuscharme Gehbeläge

Für den Saal sind zurzeit keine lärmarme Bestuhlung oder geräuscharme Gehbeläge geplant.

9 Optimierung der Raumakustik

Saal der FCG

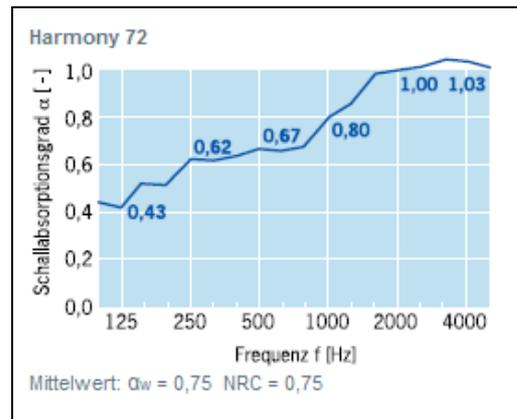
Nach der raumakustischen Planung in Kapitel 8 wurde festgestellt, dass eine Erhöhung des Raumvolumens die Nachhallzeit positiv beeinflusst. Die Primärstruktur des Saales lässt sich seitlich nicht mehr verändern. Eine Änderung der Deckenhöhe ist allerdings möglich und zulässig. Allein bei der Erhöhung der Decke um einen Meter ändert sich sowohl das Raumvolumen von 550,85 m³ auf 683,0 m³ als auch die Nachhallzeit nach Sabine von 0,7 s auf 1,2 s bei einer Frequenz von 1000 Hz (siehe Abb. 63 K.8)

Berechnung der Nachhallzeit					
Beispielraum (Quader)		Fenster		Nachhallzeit T	
Höhe	5,00 m	Anzahl	5 Stück	0,163 * (V / A)	
Breite	7,40 m	Höhe	2,00 m	1,2 sec	
Tiefe	18,46 m	Breite	1,30 m	bei Frequenz 1000 Hz	
Volumen	683,02 m ³				
Stellwände		Sichtblenden		Akustiksegel	
Anzahl	0 Stück	Anzahl	0 Stück	Anzahl	0 Stück
Höhe	0,00 m	Höhe	0,00 m	Breite	0,00 m
Breite	0,00 m	Breite	0,00 m	Tiefe	0,00 m
Flächen + Materialien				äquivalente Schallabsorptionsfläche	
				= Fläche * α_s	
				Frequenz 1000 Hz	
				α_s äquival. Fläche m ²	
Decke	Akustikdecke mittel	136,60 m ²	0,58	79,2303	25,69%
Fenster	Fensterglas	13,00 m ²	0,05	0,6500	2,44%
Wände	Putz	245,60 m ²	0,04	9,8240	46,18%
Stellwand	Fensterglas	0,00 m ²	0,05	0,0000	0,00%
Sichtblenden	Fensterglas	0,00 m ²	0,05	0,0000	0,00%
Akustiksegel	Beton	0,00 m ²	0,04	0,0000	0,00%
Boden	Beton	136,60 m ²	0,04	5,4642	25,69%
		Summe		95,1685	100,00%

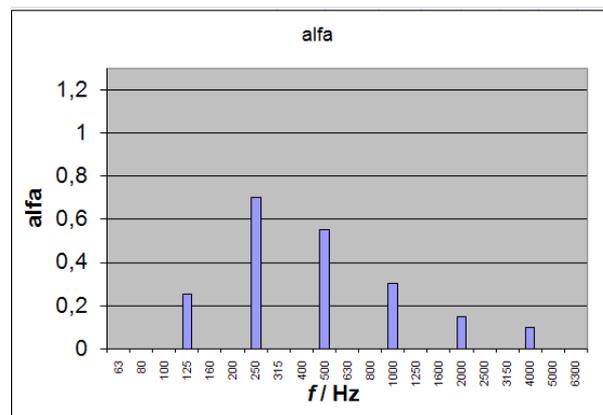
Abb. 64 Berechnung der Nachhallzeit nach Sabine in Abhängigkeit des Raumvolumens [13]

Um die Nachhallzeit nicht künstlich²⁵ zu verlängern gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die Erhöhung der Decke und der Einsatz von Reflektoren wäre eine Variante, Eine andere Möglichkeit wäre die partielle Modifikation bzw. der Tausch der Materialien der Oberflächen. Von Anfang an entstand die Vermutung, dass die aufgehängte Decke der Grund dafür ist, dass die Werte der Nachhallzeit so niedrig waren. Nach einer näheren Analyse der aufgehängten Decke stellte sich heraus, dass der Absorptionsgrad α der Decke tatsächlich hoch liegt. Er liegt bei $\alpha_w=75$ und ist vor allem in den höheren Frequenzbereichen wirksam.

²⁵ Die künstliche Verlängerung der Nachhallzeit erfolgt durch Einsatz der Elektroakustik.

Abb. 65 Schallabsorptionsgrad der Deckenplatte²⁶

Gleichmäßig verteilt oberhalb der aufgehängten Decke liegt eine 40 cm dicke Glaswolle-Schicht deren Absorptionsgrad bei $\alpha_w=34$ liegt. Das Absorptionsgraddiagramm in Bild Abb. 66 zeigt deutlich, dass dieses Material meistens die tiefen Frequenzen absorbiert.

Abb. 66 Absorptionsgrad der Glaswolle in HJ²⁷

Die Kombination der Deckenplatte zusammen mit der Glaswolle erhöht die schallabsorbierende Wirkung der Decke in den tiefen sowie in den höheren Frequenzbereichen. Da die aufgehängte akustische Decke mit einem bestimmten Abstand von $d_L=1,60$ m von der Rohdecke montiert ist (s. *Anhang B*), entstand die Annahme dass die Decke noch dazu als Masse-Feder-System funktioniert und dadurch würde sich der Schallabsorptionsgrad der aufgehängten Decke weiter vergrößern. Die dünne Deckenplatte wirkt als Masse und die dahinter eingeschlossene Luft als Feder. Die hohe Schallabsorption kommt zustande, wenn das Masse-Feder-System seine Resonanzfrequenz erreicht, dann entzieht es dem Schallfeld besonders viel Energie. Gemäß Fasold ist dies hier nicht der Fall:

²⁶ Referenz: Schallabsorptionswerte OWAacoustic® premium Designs www.owa.de[9]

²⁷ Referenz: J.Meyer, Kirchenakustik, Verlag E.Bochinsky

„Das eingeschlossene Luftvolumen wirkt bei einem Plattenschwinger nur dann als Feder, wenn der Wandabstand d_L kleiner als die Wellenlänge λ_0 bei Resonanz ist, näherungsweise kleiner als $\lambda_0/12$. Das begrenzt den wählbaren Wandabstand gemäß

$$d_L \leq \frac{\lambda_0}{12} \leq \frac{2800}{f_0} \text{ cm} \quad \text{Glg. 7}$$

d_L Abstand zwischen Plattenrückseite und Decke
 λ_0 Wellenlänge bei Resonanz
 f_0 Resonanzfrequenz

Eine Vergrößerung des Wandabstandes über die . Glg. 7 gegebene Grenze hinaus bedeutet, daß die Resonanzfrequenz f_0 im Frequenzverlauf des Schallabsorptionsgrades nicht mehr in Erscheinung tritt. *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*

Das heißt, dass bei einem Wandabstand von $d_L=160$ cm die Resonanzfrequenz kleiner als $f_0 \leq 17,5$ Hz ist. Aus diesem Grund wirkt die Deckenplatte **nicht** als Resonanzabsorber und somit erhöht sich der Schallabsorptionsgrad der akustischen Decke nicht weiter.

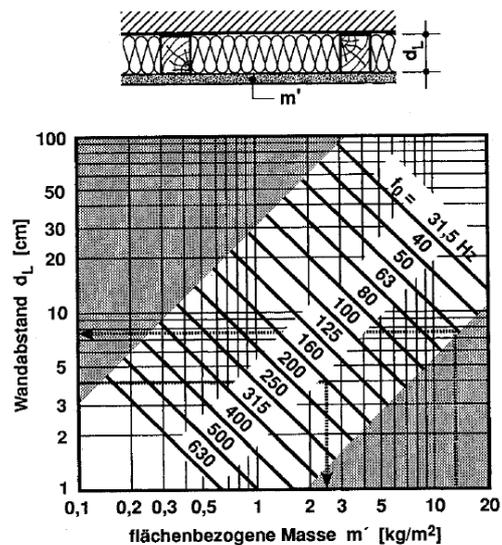


Abb. 67 Resonanzfrequenz von Plattenschwingern in Abhängigkeit von Wandabstand. *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.S.83*

9.1 Maßnahmen zur Optimierung der Raumakustik

Dieser Abschnitt schlägt in drei verschiedenen Varianten vor, welche Maßnahmen zu treffen sind, um die Raumakustik des Saales zu optimieren. Jede Variante wird untersucht und mit Hilfe von Catt-Acoustic simuliert. Schließlich werden diese Varianten miteinander verglichen und diskutiert. Es ist zu erwarten, dass die akustischen Werte für die Nachhallzeit sowie die Werte der Gütemaße jeder Variante ein Optimum erreichen.

9.1.1 Variante A

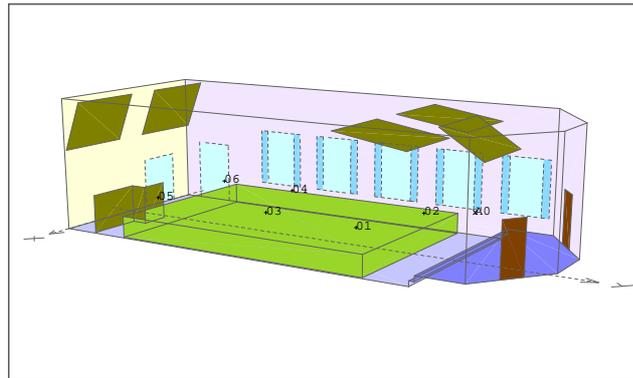


Abb. 68 Variante A

Da die Nachhallzeit vom Raumvolumen abhängig ist, wird in dieser Variante die akustische Decke ohne die Materialien der Decke zu verändern um 0,70 m erhöht. Diese Maßnahme sollte die Nachhallzeit um 0,5 s erhöhen. Um die erste Reflexionen zu verstärken, kommt der Einbau von Reflektoren mit einer bestimmte Positionierung und Neigung im Einsatz. Dadurch sollten sich die Werte des Deutlichkeitsmaßes sowie des Klarheitsmaßes erhöhen. Die Reflexionen in der hinteren Wand, die zu Flatterecho und zur Verschlechterung des Deutlichkeitsmaßes führen können, sollten vermieden werden. Der Aufbau von einer breitbändigen wirksamen Schallabsorptionsfläche im hinteren Bereich kann diese spätere Schallreflexionen reduzieren.

Sekundäre Maßnahmen:

Deckenumbau:

- Erhöhung des Lüftungssystems oberhalb der akustischen Decke um 70 cm.
- Erhöhung der akustischen Decke sowie des Beleuchtungssystems um 70 cm

Reflektoren:

Die Reflektoren sind so zu wählen, dass die Schalllenkung nach dem Reflexionsgesetz an die mittleren und hinteren Zuhörplätze geometrisch gerichtet werden. Die Reflektoren sind als ebene Flächen zu betrachten. Das heißt, dass der Ausfallswinkel des Schallstrahles von der Schallquelle in diesem Fall genau so groß wie der Einfallswinkel $\alpha = \beta$ ist.

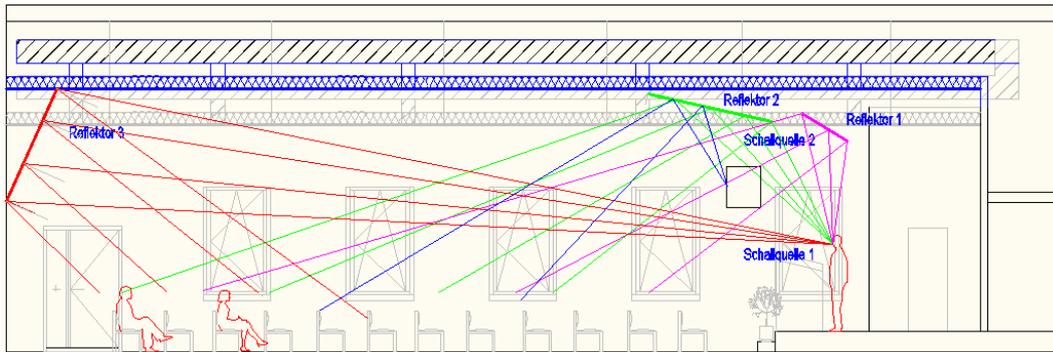


Abb. 69 Reflexionslenkung mit Hilfe von Reflektoren nach Reflexionsgesetz

Wirkungsbereich von Reflektoren

Der Wirkungsbereich von Reflektoren reicht in umso tiefere Frequenzen hinab

- je größer der Reflektor ist
- je kleiner der Abstand zur Schallquelle ist
- je kleiner der Abstand zum Hörer ist
- je steiler der Schall auf den Reflektor auftrifft [12]

Neigung:

Zur Bestimmung der Neigung der Reflektoren in Bezug zur horizontalen Ebene müssen Sender und Hörer-Abstand sowie Einfallswinkel einbezogen werden. Die Neigungen der Reflektoren sind so zu wählen, dass eine verstärkte Reflexionslenkung in dem benachteiligten Gebiet stattfindet.

Mindestgröße:

Damit die Reflexionsfläche bis zu einer unteren Grenzfrequenz²⁸ f_u als spiegelnde Reflektoren wirksam sind, muss man die Mindestabmessungen solcher Flächen bestimmen. Um die Mindestgröße eines beliebigen Reflektors zu bemessen, kann man aus folgender Näherungsgleichung die Breite bestimmen:

$$f_u \approx 700 \frac{a_1 \cdot a_2}{(b \cos \alpha)^2 (a_1 + a_2)} \text{ Hz} \quad \text{Glg. 8}$$

$$\rightarrow b_{\text{erf}} \approx \sqrt{\frac{700 \cdot a_1 \cdot a_2}{(a_1 + a_2) \cdot f_u}} \frac{1}{\cos \alpha} \text{ m} \quad \text{Glg. 9}$$

Mit:

a_1 Schallquellabstand in m

a_2 Hörerabstand in m

b Breite der Reflexionsfläche

α Schalleinfallswinkel

Für dieses Beispiel ist zur Verbesserung der
Beispiel: Berechnung der Breite der Reflektor

²⁸ Die untere Grenzfrequenz f_u , wird als die Frequenz ab der überhaupt Wellenausbreitung auftritt bezeichnet.

Für einen Reflektor in Entfernung von 2 m zur Schallquelle und 8m zum Hörer ergibt sich aus einem Schalleinfallswinkel von 45° und einer erwarteten Grundfrequenz von 300 Hz eine Mindestseitenlänge von 2.73 m. für einen Schalleinfallswinkel von 30° reduziert sich die Mindestbreite auf 2 m.(siehe

$$\rightarrow berf \approx \frac{\sqrt{700 \cdot a_1 \cdot a_2}}{\cos \alpha} \cdot f_u \quad m \quad \text{Glg. 9).}$$

Mit Hilfe vom folgenden Nanogramm auf Bild .Abb. 70 kann man auch die Breite und die GrundFrequenz abschätzen:

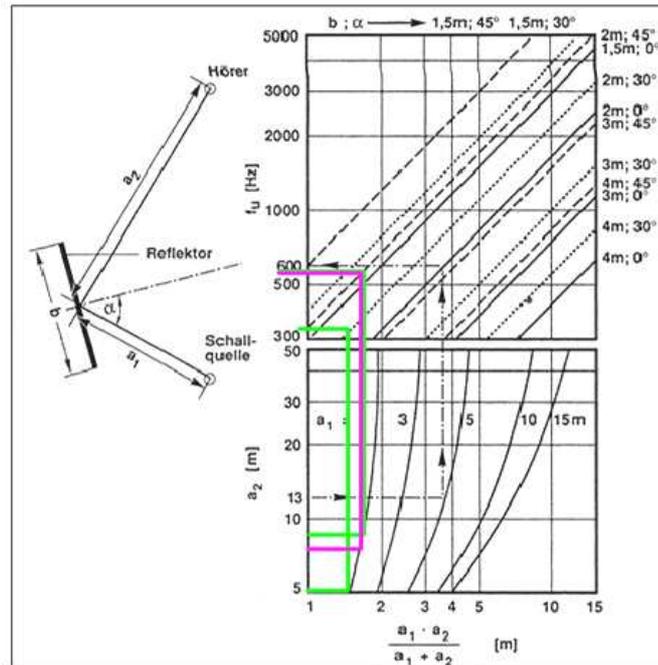


Abb. 70 Mindestgröße von Flächen und spiegelnde Reflexionen

Die Grüne Linie entspricht dem eingetragenen Beispiel: s. Text
Die Rosa Linie stellt die Mindestgröße von Reflektor 1

Material:

Hier ist zu beachten, dass die Reflektoren nur dann reflektieren und nicht absorbieren, wenn sie ausreichend schwer sind. Je tiefer die Frequenzen sind, desto größer sollte die erforderliche flächenbezogene Masse²⁹ sein. Zur Reflexion von Sprache genügen 10 kg/m², für Musikinstrumente mittlerer Tonlagen sind 20 kg/m² notwendig und für Musik sind vor allem in Schallquellenähe etwa 40 kg/m².

Vorschlagsmaterialien:

- Plexiglas

²⁹ Die flächenbezogene Masse wird als das Verhältnis von Masse und Fläche einer Schicht bezeichnet. Die metrische Einheit ist g/m²

- Holz

In folgender Tabelle ist eine kurze Beschreibung der Reflektoren eingefügt, maßstäbliche Pläne sind im *Anhang B* zu finden:

Reflektor Nr.	Position im Saal	Abmessungen [m]	Fläche [m ²]	Neigung
1	Oberhalb der Sprecher	1x 2x3	6	31°
2	Oberhalb die Boxen	2x 2,5x3	15	13°
3	Rückwand	2x 2x3	12	66°

Tab. 15 Reflektoren Variante A

9.1.1.1 Simulation der Variante A

Die akustischen Simulationen wurden mit Hilfe von *Catt Acoustic*- Programm durchgeführt. Das ursprüngliche Modell wurde modifiziert sodass die Höhe der Decke von 4,40 m auf 5,10 m geändert wurde. Ein zusätzlicher Geo-File wurde im Master File eingeführt, um die Reflektoren mit den vorgegebenen Abmessungen darzustellen. Die Position der Schallquelle sowie die Mikrofon-Positionen blieben unverändert. Hier sind hauptsächlich die Nachhallzeit T_{30} und die Werte des Deutlichkeitsmaßes D_{50} sowie des Klarheitsmaßes C_{80} besonders wichtig für die Auswertung der verschiedenen Varianten.

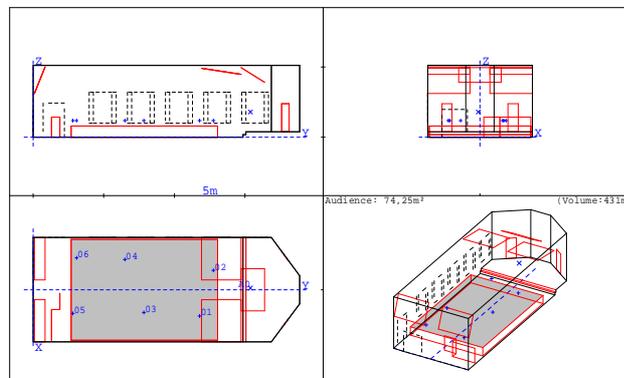


Abb. 71 Simulationsmodell der Variante A

Nachhallzeit T_{30}

Die Nachhallzeit der Simulationen lässt sich in folgenden Abbildungen durch die blaue Linien darstellen. *Abb. 72* auf der linken Seite zeigt die aktuelle Nachhallzeit des Saales und *Abb. 73* stellt die Nachhallzeit der Variante A nach dem Einsatz von Reflektoren und der Erhöhung der Decke dar. Auf den ersten Blick sind die Unterschiede fast übersehbar. Die Nachhallzeit der Variante A zeigt ähnliche Werte wie die aktuelle Nachhallzeit. Die erwartete Verlängerung der Nachhallzeit trifft in dieser Variante nicht wirklich zu. Eine erste Simulation ohne den Einsatz von Reflektoren aber mit Erhöhung der Decke zeigte eine deutliche Verlängerung der Nachhallzeit durch Vergrößerung des Raumvolumens. Kommen die Reflektoren wieder zum Einsatz, so verkürzt sich sogar die Nachhallzeit in den tiefen

Frequenzen und erhöht sich wieder zwischen den höheren Frequenzbereichen. Die Unterschiede zwischen beiden Kurven der Nachhallzeit sind in **iError! No se encuentra el origen de la referencia.** Tab. 16 numerisch dargestellt.

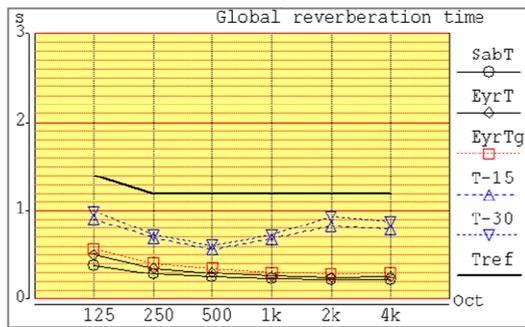


Abb. 72 Aktuelle Nachhallzeit

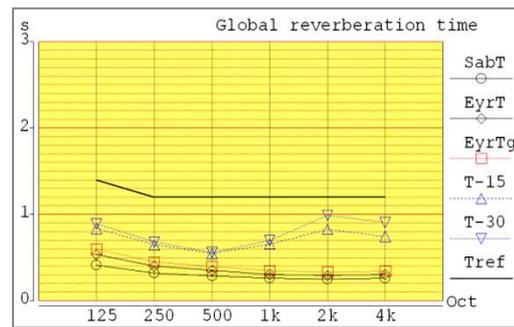


Abb. 73 Nachhallzeit Variante A

Gütemaße D_{50} und C_{80}

Durch die Funktion *Audience Area Mapping* lassen sich in Catt das Deutlichkeitsmaß D_{50} und das Klarheitsmaß C_{80} auf die Publikumsfläche farbcodiert darstellen. Für das Deutlichkeitsmaß nach Abb. 74 zeigen die Farben auf der gesamten Publikumsebene Werte über 60%, was eine sehr gute Hörbarkeit der Sprache im gesamten Saal bedeutet. Die Werte des Klarheitsmaßes weisen eine höhere Durchsichtigkeit von Musik und eine Verbesserung der Qualität von Musikempfindung im Saal auf. Allerdings erreichen diese Werte nach Tab. 8 (siehe K.6 S.36) kein Optimum. Die Werte der Gütemaße sind Tab. 16 in zu finden.

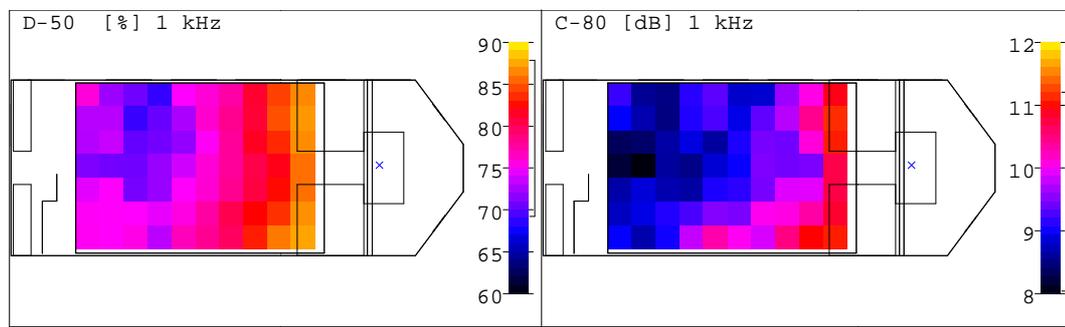


Abb. 74 Gütemaße farbcodiert auf Publikumsebene

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
T_{30} aktuell	0,99	0,72	0,61	0,72	0,93	0,87
T_{30} Var.A	0,89	0,68	0,56	0,70	0,99	0,91
Gütemaße						
$D_{50}\%$	70,1	76,2	79,8	81,5	82,1	80,8
C_{80} dB	7,5	9,2	10,4	11,0	10,6	10,4

Tab. 16 Nachhallzeit und Gütemaße der Variante A

Zusammenfassung

Insgesamt zeigen die Maßnahmen der Variante A wenig Einfluss auf raumakustische Kriterien. Die Nachhallzeit wird durch diese Maßnahmen nicht wirklich verlängert und es wird kein Optimum erreicht. Es ist möglich, dass durch den Einsatz von Reflektoren die Erhöhung der Decke ihre Wirkung verliert. Die Umbaukosten können ziemlich hoch sein, trotzdem würde sich die raumakustische Situation des Saales wenig oder nicht verbessern. Der Einsatz von Reflektoren ist in diesem Fall keine sinnvolle Lösung. Andererseits bedeutet die Erhöhung der Decke ohne den Einsatz von Reflektoren noch immer eine Verlängerung der Nachhallzeit.

9.1.2 Variante B

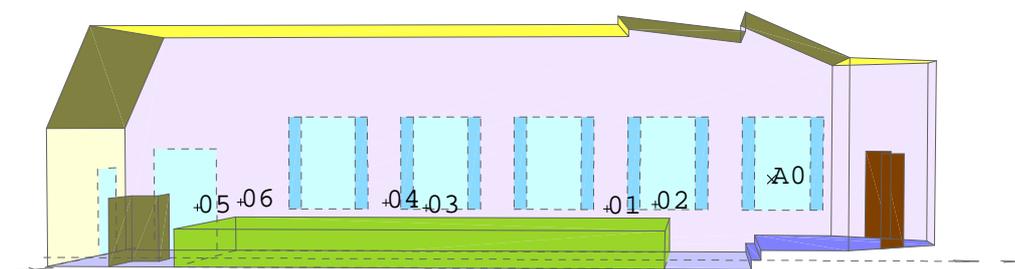


Abb. 75 Variante B

Hier analog zur Variante A, erfolgt die Verlängerung der Nachhallzeit durch Vergrößerung des Raumvolumens. Im Vergleich zur ersten Variante ist für diese Variante ein kompletter Umbau der aufgehängten Decke notwendig. Will man komplett auf die Reflektoren verzichten, so muss die Decke einer Kombination von Schallreflexions- und Absorptionsfläche entsprechen. Die Decke ist in fünf Abschnitte geteilt. Oberhalb des Podiums bleibt die akustische Decke unverändert und ohne Erhöhung. Über den Sprecherbereich ist ein Deckenelement um 27° geneigt, um die Verständlichkeit der Sprache zu verstärken. Die Oberfläche, welche als Reflexionsoberfläche wirkt, sollte aus dichten, glatten porös-freien Oberflächen bestehen (z.B.: 50 mm starke Holzplatte mit einer flächenbezogenen Masse von $m' = 40 \text{ kg/m}^2$). Nach einem kleinen Höhengsprung von 40 cm wirkt ein zweites Deckenelement aus demselben Material mit einer Neigung von 8° als Reflexionsfläche über die Lautsprecher. Dieser Deckenabschnitt soll die Durchsichtigkeit von Musik in den mittleren und hinteren Zuhörerplätzen unterstützen. Damit diese Reflexionsoberfläche optimal wirkt, müssen die Boxen auch erhöht werden. Direkt über dem Publikum entsteht eine Erhöhung der Decke um 70 cm, die als akustische Decke wirkt. Bei Direktschall soll die den hinteren Zuhörerplätzen zugewandte Rückenwand den Schall lenken und diesen unterstützen. Detaillierte Abmessungen der Pläne sind im *Anhang B* zu finden.

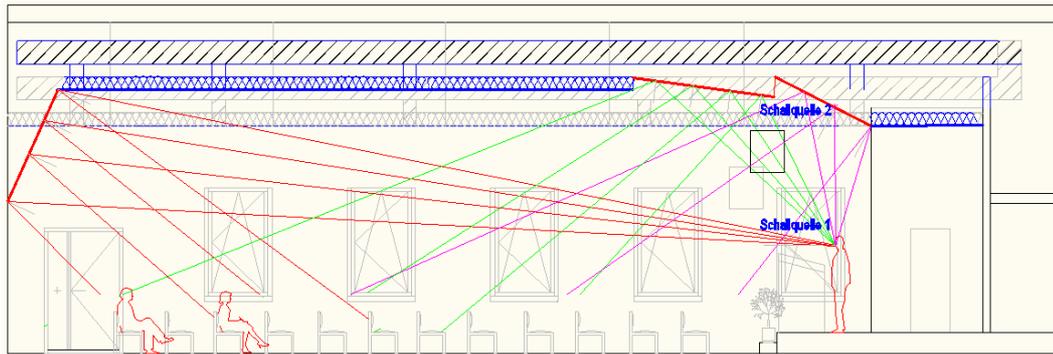


Abb. 76 Erste SchallReflexionen bei geneigte Decke / Variante B

9.1.2.1 Simulation der Variante B

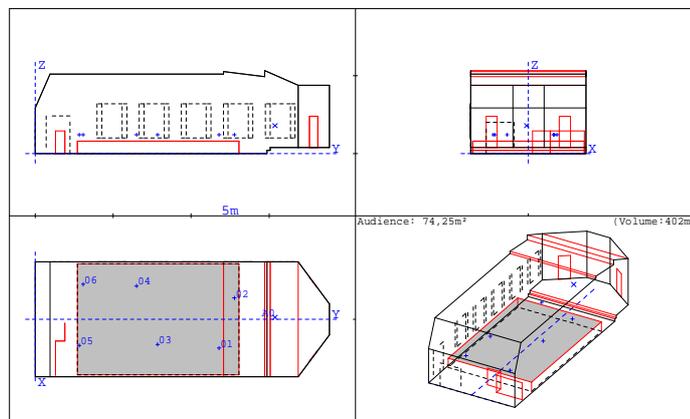


Abb. 77 Simulation der Variante B

Nachhallzeit

Die Nachhallzeit der Variante B in Abb. 79 zeigt deutlich ein Verlängerung der Nachhallzeit vor allem in den mittleren Frequenzen mit einem Unterschied von etwa 0,5 Sekunden bei 500 Hz. Eine Verkürzung der Nachhallzeit um 0,10 Sekunden bei 125 Hz findet am Anfang statt, doch weisen diese Werte insgesamt eine Verlängerung der Nachhallzeit auf.

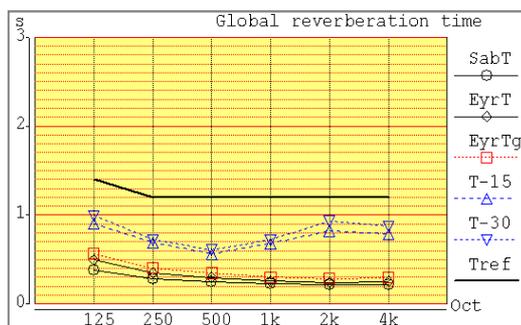


Abb. 78 aktuelle Nachhallzeit

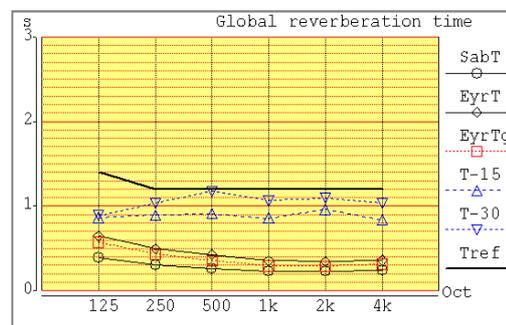


Abb. 79 Nachhallzeit Variante B

Gütemaße

Im Vergleich zur Variante A sind die Werte der Gütemaße in der Variante B für das Deutlichkeitsmaß D_{50} niedriger. Dennoch weisen diese Werte (auch in den hinteren Plätzen) noch immer ein gutes Deutlichkeitsmaß auf, das über 60% liegt. Ebenso

zeigen die Werte des Klarheitsmaßes C_{80} im Gegensatz zur Variante A eine kleine Verbesserung in der Durchsichtigkeit von Musik (vor allem in den hinteren Plätzen). Ein Optimum des Klarheitsmaßes wird in diese Variante nicht erreicht. Die Werte der Gütemaße sind in *Tab. 17* zu finden und in *Abb. 80* auf der Publikumsebene farbcodiert dargestellt.

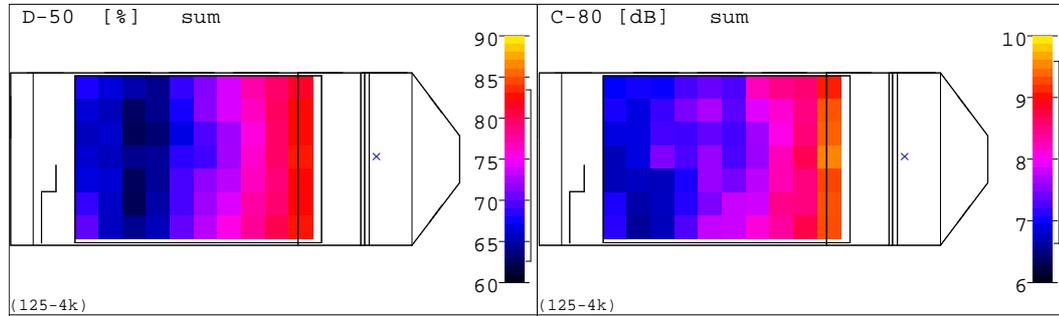


Abb. 80 Gütemaße farbcodiert auf Publikumsebene

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
T_{30} aktuell	0,99	0,72	0,61	0,72	0,93	0,87
T_{30} Var.B	0,89	1,03	1,17	1,07	1,09	1,03
Gütemaße						
$D_{50}\%$	67,1	69,5	73,4	77,7	77,2	77,7
C_{80} dB	6,5	7,4	8,0	9,2	9,1	9,3

Tab. 17 Nachhallzeit und Gütemaße der Variante B

Zusammenfassung

Durch einen kompletten Umbau der aufgehängten Decke und einer Kombination von Schallreflexions- und Absorptionsflächen werden optimale Werte für die Nachhallzeit und das Deutlichkeitsmaß erreicht. Die Werte des Klarheitsmaßes weisen jedoch eine höhere Durchsichtigkeit für Musik auf, wobei kein Optimum erreicht wird. Das Umbauen der Decke weist hohe Kosten, Arbeits- und Zeitaufwand auf. Um die Werte des Klarheitsmaßes zu optimieren, ist eine höhere Nachhallzeit, die zwischen 1,4 und 1,2 Sekunden liegt, notwendig. Dafür ist eine weitere Erhöhung des Raumvolumens und der Einsatz von Diffusoren nötig, die alle reflektierten Schallstrahlen in alle Raumwinkel gleichmäßig verteilt.

9.1.3 Variante C

Die Umbaukosten, der Zeit- und Arbeitsaufwand spielen in der akustischen Sanierung dieses Saales eine wesentliche Rolle, deswegen entstand die Frage ob es eine einfachere und kostengünstigere Variante gibt. Eine zweite Möglichkeit, die Nachhallzeit des Versammlungsraumes zu erhöhen ohne das Raumvolumen zu verändern kann durch Modifizierung von Bauelementen oder den Tausch von Materialien erreicht werden. Die Abbildung *Abb. 81* verdeutlicht, wie die Nachhallzeit besonders von der akustischen Decke beeinflusst wird. Für den Veranstaltungssaal für Musik und Sprache sind die Anforderungen nach DIN 18041 nicht erfüllt. [9][4]

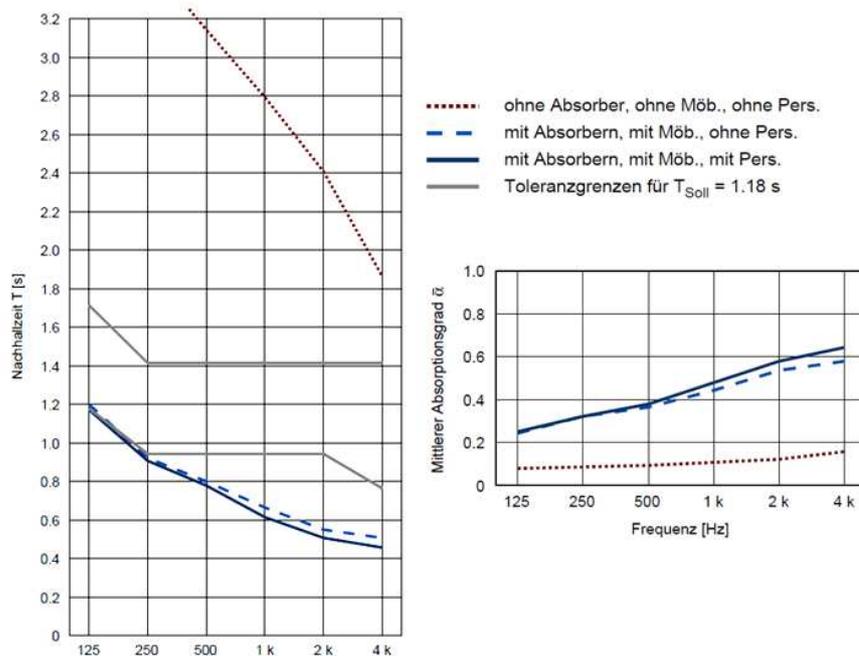


Abb. 81 Nachhallzeit mit Harmony-Platte [9]

Werden einfach eine gewisse Anzahl von Mineralwoll-Platten gegen anderes Material oder eines, dessen Absorptionsgrades nicht so hoch liegt, umgetauscht, so schwächt sich die Absorptionswirkung der Decke in bestimmte Bereichen, folglich erhöht sich die Nachhallzeit. Werden zum Beispiel die aktuellen Mineralwoll-Platten gegen andere Platten mit einem geringen Absorptionsgrad um etwa 70% getauscht, so erhöht sich deutlich die Nachhallzeit. Gleichzeitig könnten diese Platten sogar als Reflexionsflächen für höhere Frequenzen wirken.³⁰

³⁰ Mineralwolle-Platten besitzen eine flächenbezogene Masse ca. 10 kg/m²

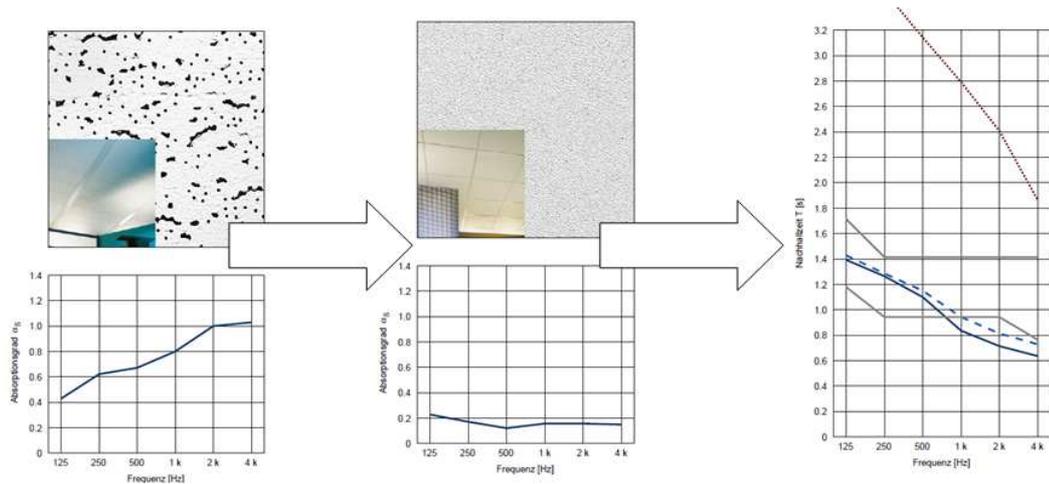


Abb. 82 Erhöhung der Nachhallzeit durch das Umtauschen der Deckenplatten[9]

Durch Modifizierung der aktuellen Materialien kann man ein ähnliches Ergebnis erreichen. Der Absorptionsgrad eines Materials ist von seiner Porosität abhängig. Aus diesem Prinzip ist ersichtlich, dass durch Veränderung der Porosität in den Mineralwolle-Platten deren Absorptionsgrad beeinflusst werden kann. Die Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Porosität ist in folgender Abbildung dargestellt:

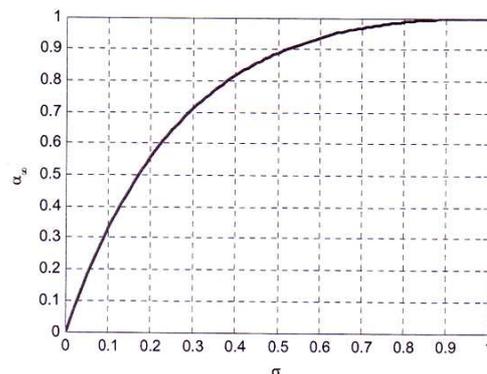


Abb. 83 Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Porosität.[6];**Error! No se encuentra el origen de la referencia.** S.124

Für den Grenzfall $\sigma = 1$ ergibt sich $\alpha = 1$, aber ist auch zu beachten, dass für ein Material mit niedriger Porosität von 0,5 der Absorptionsgrad noch immer bei $\alpha = 0,9$ liegt. Die Porosität der Mineralwolle-Platte kann man modifizieren indem man die Platte mit einer dichten Farbe bestreicht. Dadurch schließen sich die Poren und der Absorptionsgrad der Platte wird auf etwa $\alpha = 0,2 - 0,3$ abgeschwächt. Es ist dann die Frage zu stellen, wie groß die Abmessungen solcher zu streichenden Flächen mindestens sein müssen, damit sie bis zu einer unterer Grenzfrequenz als spiegelnder Reflektor wirksam werden. Die Anwendung der graphischen Planungsmethode für die Reflexionsfläche bei ebener Decke wird in *Abb. 84* verdeutlicht.

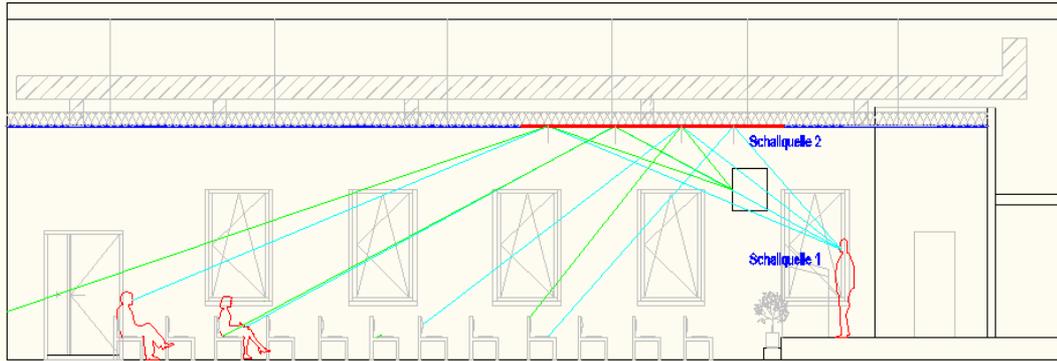


Abb. 84 Reflexionen bei ebener Decke

Hierbei handelt es sich um eine Reflexionsfläche mit den Abmessungen 5x7,40 m. Das entspricht einer Fläche von 37 m² und 26% der gesamten Decke. Allerdings ist es möglich, dass es nicht ausreichend wäre, nur 26% der Decke mit Farbe zu streichen, um die Nachhallzeit zu verlängern. Wird die mit Farbe gestrichene Fläche größer als 5 m, so treffen bei horizontaler Decke einige unerwünschte Sekundärreflexionen über die Reflexionsfläche auf die Rückwand. Das bedeutet eine schlechtere Verständlichkeit von Gesprochenem im Raum. Durch den Einsatz eines breitbandig wirksamen Schallabsorbers lassen sich diese Sekundärreflexionen dämpfen. Die aktuellen Mineralwoll-Platten können als Resonanzabsorber verwendet werden. Solche Absorber lassen sich nach *Abb. 85* leicht konstruieren. Die Mineralwolle-Platte, die eine flächenbezogene Masse von $m' = 4,5 \text{ kg/m}^2$ besitzt, kann auf einen Lattenrost mit einem Dämmstoff im Hohlraum hinter der Platte montiert werden. Mit einem Wandabstand von $d_L = 10 \text{ cm}$ lautet die Grundfrequenz etwa $f_o = 80 \text{ Hz}$ und somit erhöht sich die Wirkung des Absorptionsgrades der Resonanzabsorber.

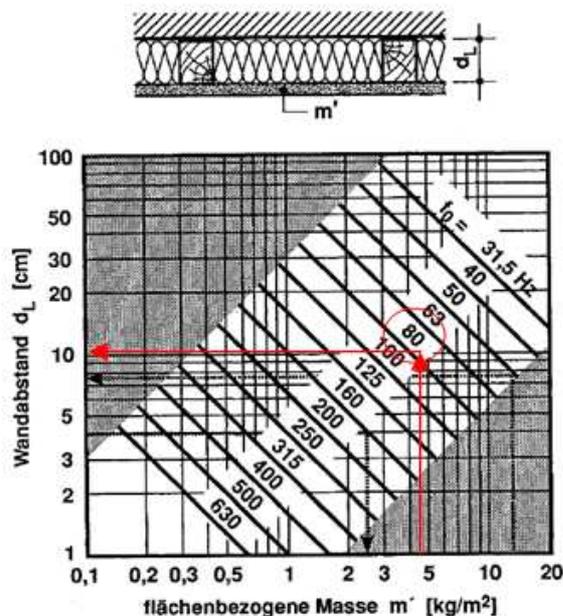


Abb. 85 Resonanzabsorber auf den Rückwand unten[6]s.83

9.1.3.1 Simulation der Variante C ohne Absorber

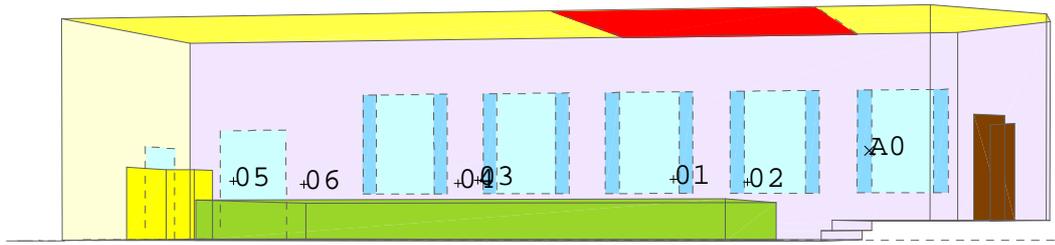


Abb. 86 Variante C ohne Absorber

Die erste Simulation dieser Variante entspricht einem Tausch der Deckenmaterialien um 26%. Die Deckenfläche mit einem geringen Absorptionsgrad besitzt die Abmessung 5x7,40 m und liegt direkt über die Lautsprecher und den vorderen Sitzplätzen. Der Einsatz eines breitbandig wirksamen Schallabsorbers wird für diese Simulation nicht berücksichtigt.

Nachhallzeit

Diese erste Simulation zeigt eindeutig eine Verlängerung der Nachhallzeit in fast allen Frequenzbereichen. Bei 250 und 500 Hz ergeben sich Unterschiede in der Nachhallzeit von 0,52 und 0,67 Sekunde jeweils. Die höheren Frequenzbereiche zeigen auch eine nicht zu kleine Verlängerung der Nachhallzeit und Unterschiede von etwa 0,3 Sekunden. Die Werte der Nachhallzeit sowie die Gütemaße sind in folgender Tabelle zu vergleichen:

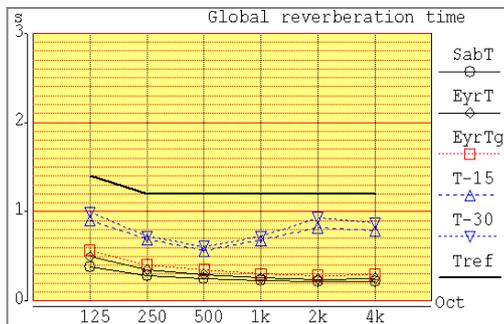


Abb. 87 Aktuelle Nachhallzeit

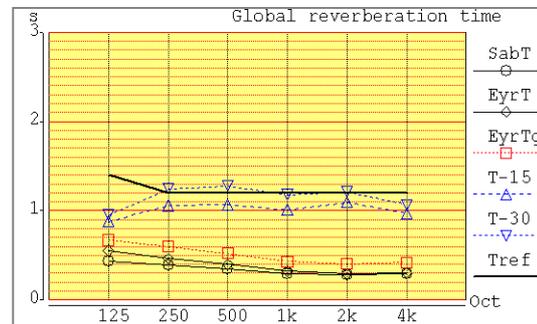


Abb. 88 Nachhallzeit Variante C

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
T ₃₀ aktuell	0,99	0,72	0,61	0,72	0,93	0,87
T ₃₀ Var.C	0,96	1,24	1,28	1,18	1,21	1,07
Gütemaße						
D ₅₀ %	70,9	72,7	75,6	79,7	82,3	83,7
C ₈₀ dB	7,3	7,5	8,2	9,1	9,8	10,2

Tab. 18 Nachhallzeit und Gütemaße Var.C ohne Absorber

Eine zweite Simulation für dieselbe Variante wurde durchgeführt, welche einem Tausch von 74% der Deckenplatten entspricht. Die gesamte Oberfläche besitzt ebenfalls einen geringen Absorptionsgrad und wirkt als Reflexionsfläche über das Publikum. Für diese Simulation werden zwei breitbandig wirksame Absorber auf der Rückwand in Betracht gezogen.

9.1.3.2 Simulation der Variante C mit Absorber

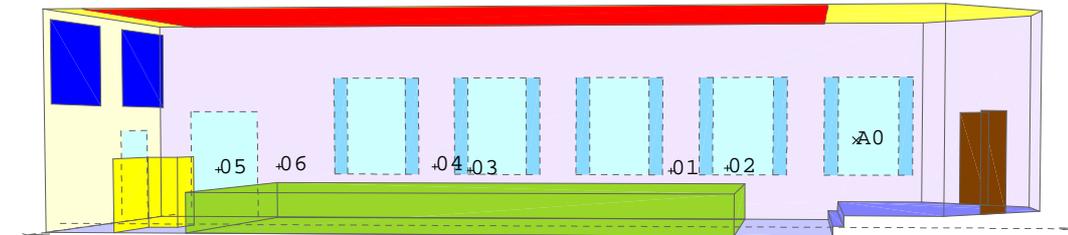


Abb. 89 Variante C mit Absorbern

Nachhallzeit

Abb. 91 zeigt ebenso eine Verlängerung der Nachhallzeit in fast allen tiefen und hohen Frequenzbereichen. Würden die Absorber nicht in die Simulation mit einbezogen, so wäre die Nachhallzeit viel länger. Die Ergebnisse der Simulation weisen trotzdem eine positive Verlängerung der Nachhallzeit auf.

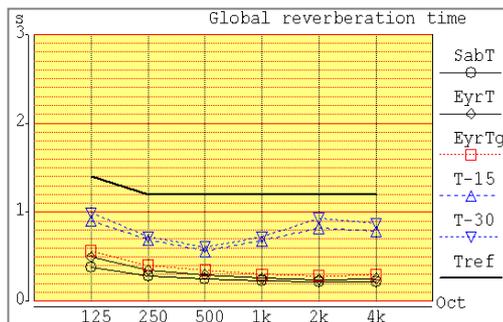


Abb. 90 aktuelle Nachhallzeit

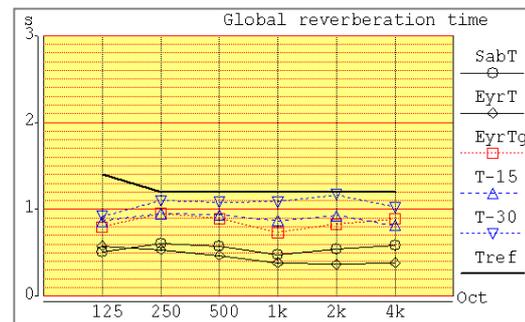


Abb. 91 Nachhallzeit Variante C mit Absorber

Gütemaße

Obwohl die Werte der Nachhallzeit nicht besser als in der ersten Simulation sind, erreichen die Ergebnisse der Gütemaße im Durchschnitt bessere Werte und sind in Abb. 92 auf der Publikumsebene farbcodiert dargestellt.

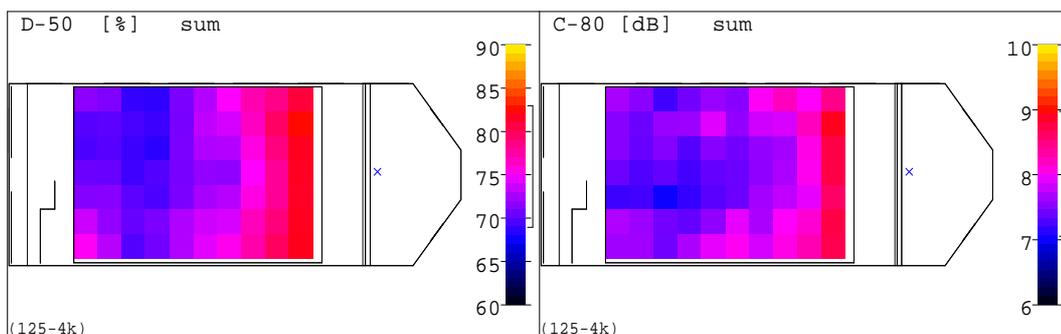


Abb. 92 Gütemaße farbcodiert auf Publikumsebene

Die Werte der Nachhallzeit sowie die Gütemaße sind in folgender Tabelle zu finden:

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
T ₃₀ aktuell	0,99	0,72	0,61	0,72	0,93	0,87
T ₃₀ Var.C mit Absorber	0,92	1,10	1,08	1,09	1,17	1,02
Gütemaße						
D ₅₀ %	68,7	70,9	73,6	78,9	79,3	78,6
C ₈₀ dB	6,7	7,0	7,6	9,2	9,2	9,4

Tab. 19 Nachhallzeit und Gütemaße Var.C mit Absorber

Zusammenfassung

Die Variante C entspricht einer einfachen und kostengünstigen Lösung, welche viel bessere Ergebnisse als Variante A und B liefert. Die erste Simulation der Variante C zeigt eine deutliche Verlängerung der Nachhallzeit. Darüber hinaus ist der Einsatz eines breitbandig wirksamen Absorbers nicht notwendig. In keiner von beiden Simulationen wurde ein Optimum des Klarheitsmaßes erreicht. Es ist möglich, dass eine Kombination von Erhöhung des Raumvolumens mit Tausch bzw. Modifizierung der Deckenplatten eine Verbesserung der Akustik mit sich bringt.

9.1.4 Überblick aller Varianten

Das folgende Nachhallzeit-Frequenz-Diagramm erleuchtet den Verlauf aller Simulationen im Vergleich zur akustischen Messung mit *WinMLS*. Die oberen und unteren Frequenzgrenzen symbolisieren den optimalen Bereich der Nachhallzeit nach DIN 18041[4] für einen Raum mit Verwendungszweck Musik und Sprache. Die Werte aller Ergebnisse sind tabellarisch eingetragen.

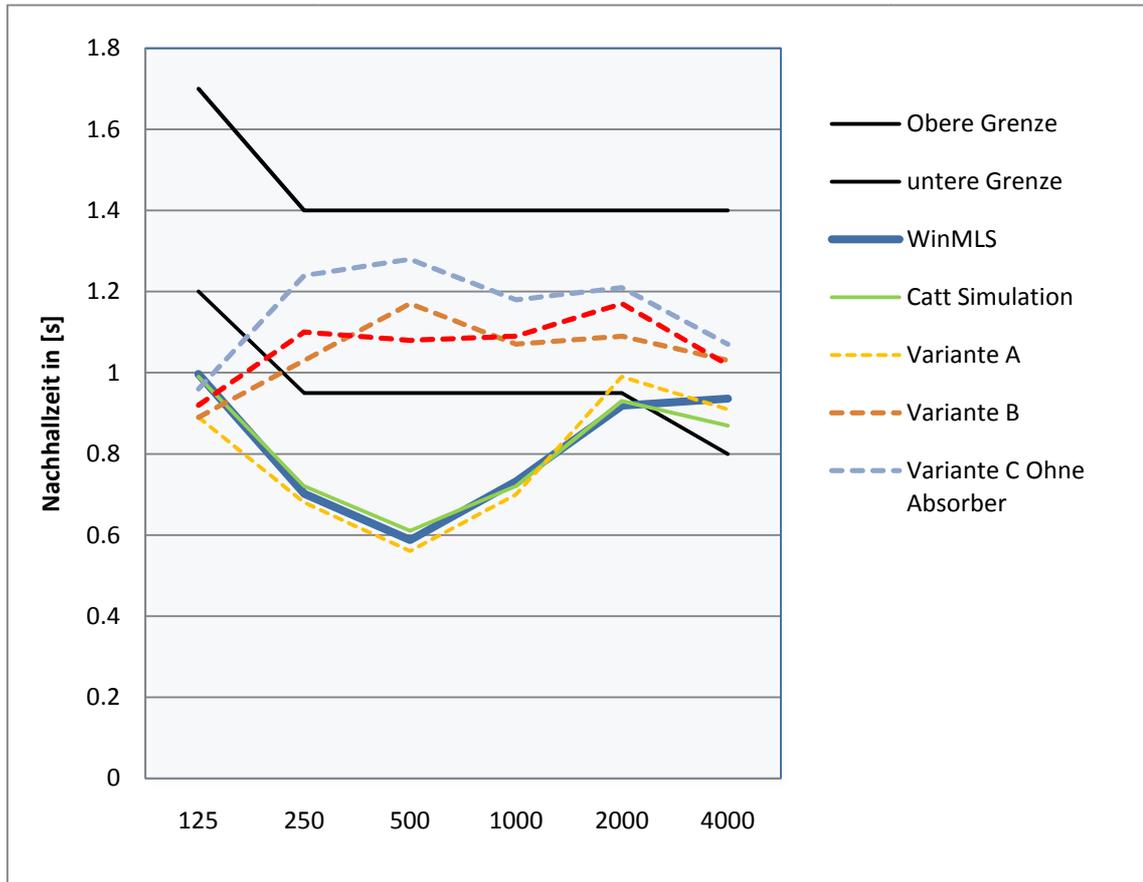


Abb. 93 Nachhallzeit der akustische Messung und Simulationen alle Varianten

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Nachhallzeit T_{30} in S						
WinMLS	1.00	0.70	0.59	0.73	0.92	0.94
Catt Simulation	0.99	0.72	0.61	0.72	0.93	0.87
T_{30} Var.A	0.89	0.68	0.56	0.7	0.99	0.91
T_{30} Var.B	0.89	1.03	1.17	1.07	1.09	1.03
T_{30} Var.C	0.96	1.24	1.28	1.18	1.21	1.07
T_{30} Var.C mit Absorber	0.92	1.1	1.08	1.09	1.17	1.02
Deutlichkeitsmaß D_{50} in %						
WinMLS						
Catt Simulation	84.7	86.2	92.5	75.8	77.2	78.7
Var.A	70,1	76,2	79,8	81,5	82,1	80,8
Var.B	67,1	69,5	73,4	77,7	77,2	77,7
Var.C	70,9	72,7	75,6	79,7	82,3	83,7
Var.C mit Absorber	68,7	70,9	73,6	78,9	79,3	78,6
Klarheitsmaß C_{80} in dB						
WinMLS	4.8	6.5	7.4	5.1	5.5	3.8
Catt Simulation	9.6	10.9	14.8	8.6	8.5	8.8
Var.A	7,5	9,2	10,4	11,0	10,6	10,4
Var.B	6,5	7,4	8,0	9,2	9,1	9,3
Var.C	7,3	7,5	8,2	9,1	9,8	10,2
Var.C mit Absorber	6,7	7,0	7,6	9,2	9,2	9,4

Tab. 20 Ergebnisse der akustischen Messungen mittel WinMLS und Simulationen mittels Catt Acoustic

Folgende Tabelle erleuchtet die Kriterien zur Beurteilung der verschiedenen Varianten.

Kriterien	Varianten		
	A	B	C
Optimierung der Nachhallzeit	✗	✓	✓
Optimierung des Deutlichkeitsmaße D_{50}	✓	✓	✓
Optimierung des Klarheitsmaßes C_{80}	✗	✗	✗
Kosten	Hoch	Hoch	Niedrig
Zeit-Arbeitsaufwand	Mittel	Mittel	Niedrig
Materialbedarf	Mittel	Mittel	Niedrig
Deckenumbau	✓	✓	✗
Einsatz von Reflektoren	✓	✗	✗
Einsatz von Absorber	✗	✗	✓
Instandhaltbarkeit	Notwendig	Nicht notwendig	Nicht notwendig
Optische Einfluss	✓	✓	✗
Vorteile	keine	Optimum für T_{30} und D_{50} wird erreicht	Kosten sind niedrig und ein Optimum für T_{30} und D_{50} wird erreicht
Nachteile	Kein Optimum wird erreicht	Kosten sind hoch	Keine Verbesserung der C_{80} wird erreicht

Tab. 21 Kriterien zur Beurteilung der Varianten

9.2 Hörsaal HS I2

Die raumakustische Planung des Hörsaales i2 ist anhand vom Leitfaden aus Kapitel 8 durchgeführt. Die Position des Hörsaales war bereits festgelegt und konnte nicht verändert werden. Im Vergleich zum Saal der FCG handelt es sich beim Hsi2 um einen Hörsaal, dessen Hauptverwendungszweck der Unterricht ist. Aus diesem Grund sind die Toleranzgrenzbereiche für die optimale Nachhallzeit nach Din 18041 für Sprache eingestellt. Die akustische Sanierung des Hörsaales fand im Jahr 2006 statt. Der Saal war laut Auftraggeber für 100 Zuhörerplätze ausgerichtet. Nach Tab. 14 (s.44) schlägt dieser Saal eine günstige Volumenkenzahl von $3 - 6 \text{ m}^3 / \text{Platz}$ vor. Günstige Raumvolumina liegen für 100 Zuhörerplätze also bei $300 \text{ bis } 600 \text{ m}^3$. Mit 578 m^3 liegt das Hörsaalvolumen innerhalb des Sollbereiches. Die rechteckige Grundform der Grundfläche sowie die Sitzreihenüberhöhung wurden beibehalten, sodass die Direktschallversorgung aller Zuhörerplätze garantiert wurde. Außerdem wurde die Grundfläche des Raumes auf Wunsch des Auftraggebers durch bauliche Änderungen auf ca. 170 m^2 erhöht. Die mittlere Deckenhöhe sollte demnach $3,5 \text{ m}$ ($600 \text{ m}^3 / 170 \text{ m}^2$) nicht überschreiten. Damit die Decke für nützliche Reflexionen im oberen Frequenzbereich wirksam blieb, durfte sie nicht als Mitten- oder Höhenabsorber ausgeführt werden. Die Rückwand bewirkte störende Reflexionen und musste deshalb breitbandig absorbierend ausgeführt werden.

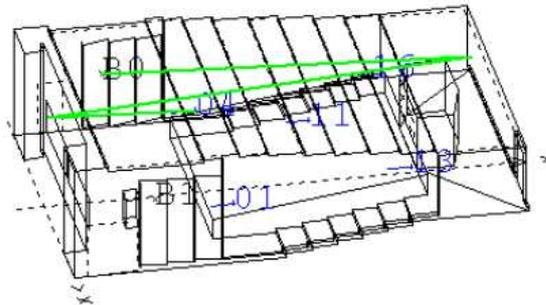


Abb. 94 Störende Reflexionen an der Rückwand

Durch Teilflächengliederungen wurde eine Reflexionsschallversorgung erreicht. Die Seitenwände des vorderen Saalabschnittes wurden leicht mit zum Publikum geneigten Reflektoren geplant. Solche Flächen vermeiden einerseits ein mögliches Flatterecho, andererseits leiten sie nützliche Reflexionen in das Publikum. Um die Direktschallversorgung zu optimieren, wurde ab der dritten Sitzreihe eine Überhöhung (Stufenbreite 90 cm, Stufenhöhe ca. 12 cm) baulich ausgeführt.

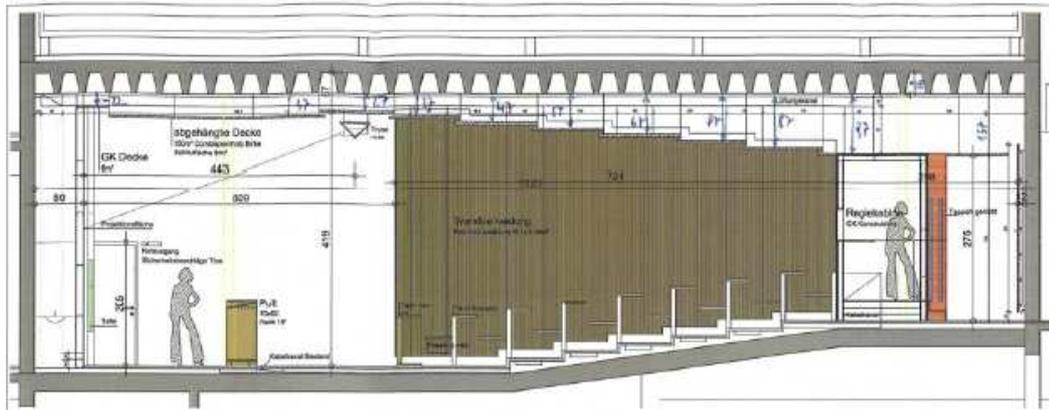


Abb. 95 Die Sitzreihenüberhöhung im HSi2

Für die Planung des Hörsaales war die Bestimmung der optimalen Nachhallzeit notwendig. Die erwünschte mittlere Nachhallzeit T_{soll} errechnete sich folgendermaßen:

$$T_{soll} = \left(0,32 \log \frac{V}{m^3} - 0,17 \right) [s] = \left(0,32 \log \frac{501 m^3}{m^3} - 0,17 \right) = 0,69 s$$

Um diese optimale Nachhallzeit zu erreichen, wurden die erforderlichen Absorptionsflächen mithilfe eines Excel-Tools, für frequenzabhängige Nachhallzeitberechnungen, durchgeführt. Die Decke wurde als Tiefenabsorber ausgeführt. Zwei Hauptvarianten haben sich nach mehreren Iterationsschritten herauskristallisiert:

Variante 1: Die Decke als Plattenabsorber (8mm Sperrholz 3,6 Kg/m²)

Diese Variante ist von der Montage her sehr einfach, es kann jedoch im tieffrequenten Bereich unterhalb von 500 Hz die notwendige äquivalente Absorptionsfläche nicht erreicht werden.

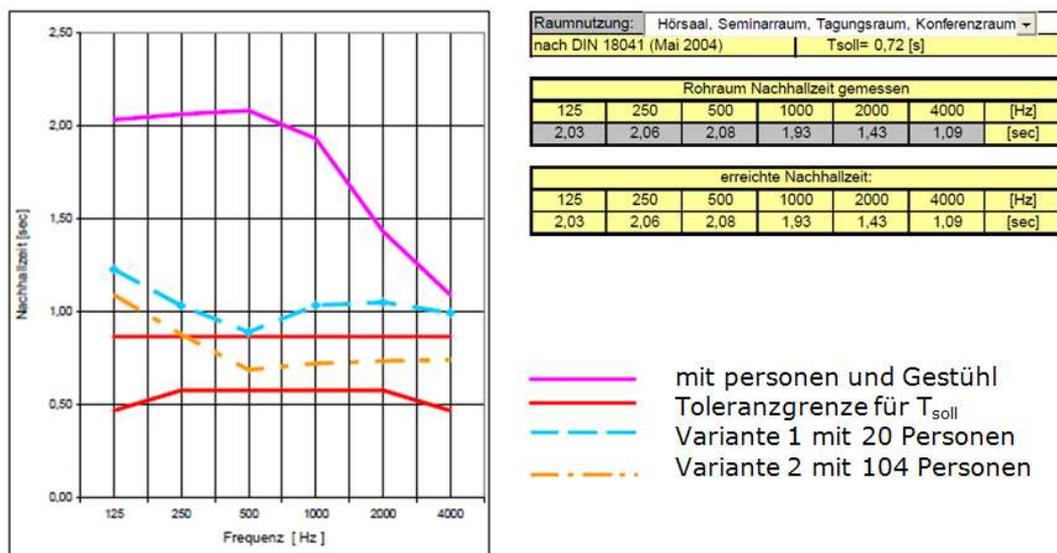


Abb. 96 Die Decke als Plattenabsorber Variante 1[10]S.188

Bei dieser Variante wurden keine optimalen Werte der Nachhallzeit erreicht.

Variante 2: die Decke als Schlitzabsorber (60 mm Schlitz 40 mm Platte)

Die Schlitzabsorberdecke wurde so berechnet, dass im tieffrequenten Bereich unter 500 Hz die notwendige äquivalente Absorptionsfläche erreicht wird. Die Montage der Decke war ebenfalls einfach und wurde so optimiert, dass sie am vorhandenen Abhängeraster der alten Hörsaaldecke montiert werden konnte.

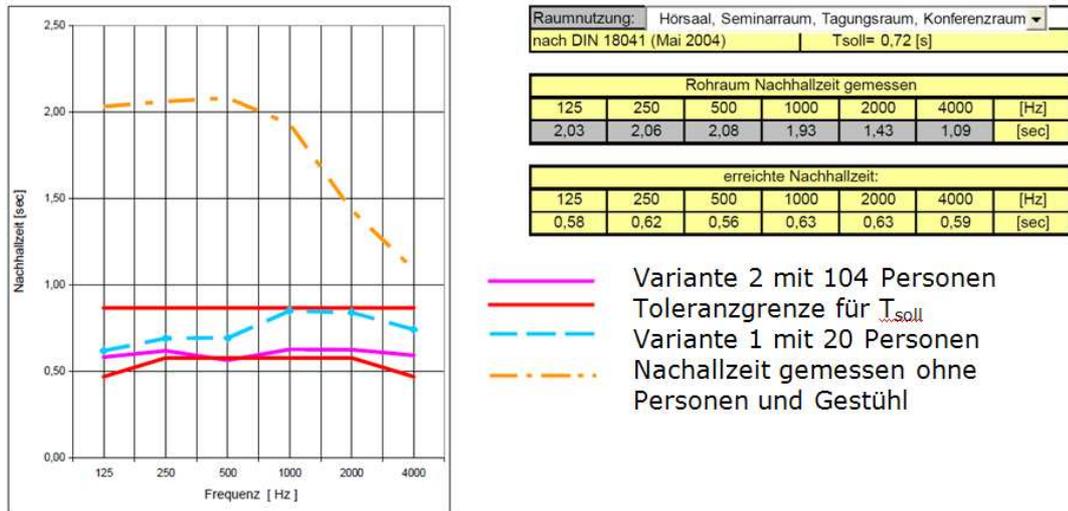


Abb. 97 Die Hsi2-Decke als Schlitzabsorber Variante 2 [10] S.189

9.2.1 Simulation des Hörsaales mittels Catt Acoustic

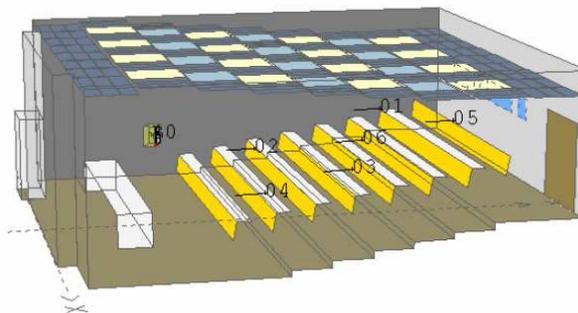


Abb. 98 HSi2 vor Simulation vor der Sanierung

Der voraussichtliche Zustand nach der raumakustischen Sanierung wurde vor Beginn der Bauarbeiten wieder simuliert, um die Planung zu verifizieren.

Nachhallzeit

Vor der akustischen Sanierung wird die Nachhallzeit mittels CATT-Acoustic dargestellt.

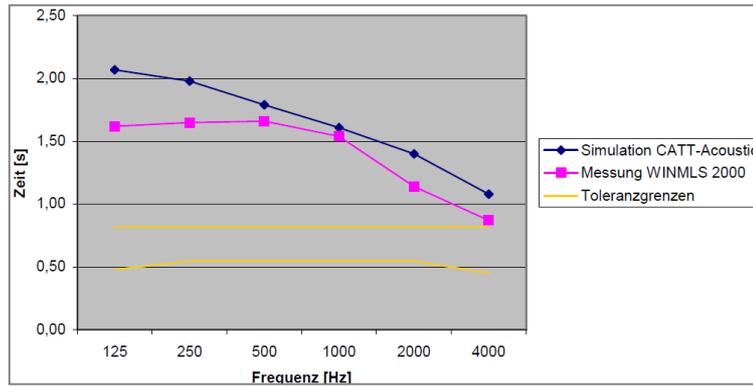


Abb. 99 Simulation des Hörsaales vor der Sanierung

Sowohl der Verlauf, als auch die Werte der Simulation spiegeln nun kleine Unterschiede hinsichtlich der realen Messergebnisse wieder. Auch die Gegenüberstellung der Ergebnisse in der Tabelle macht dies deutlich.

F [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
WinMLS [s]	1.62	1.65	1.66	1.54	1.14	0.87
CATT [s]	2.23	2.03	1.77	1.55	1.49	1.08

Tab. 22 Nachhallzeiten in HSI2

Nach der Sanierung wurde das Modell optimiert und wieder simuliert. Alle simulierten Gütemaße, vor allem der Deutlichkeitsgrad wurden durch die Sanierungsmaßnahmen optimiert. Abb. xx. zeigt eindeutig eine Verbesserung des Deutlichkeitsmaßes. Vor der Sanierung erreichten in Publikumsebene die Werte nie mehr als 40-50%, was zu einem Mangel in der Verständlichkeit der Sprache führte. Nach der Sanierung stiegen die D_{50} -Werte auf 60-70%.

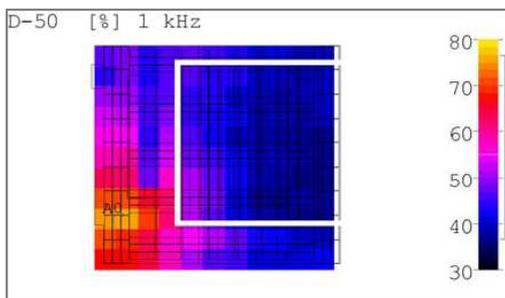


Abb. 100 D_{50} Vor der Sanierung

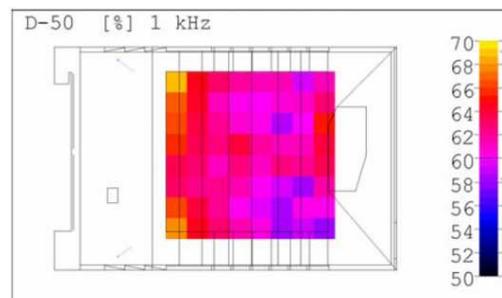


Abb. 101 D_{50} nach der Sanierung

Messung nach der Sanierung

Nach Abschluss der Sanierungsarbeiten fand wieder eine akustische Messung des Nachhallzeitfrequenzganges statt. Abb. 102 zeigt die Gegenüberstellung der gemessenen Nachhallzeiten vor und nach der Sanierung.

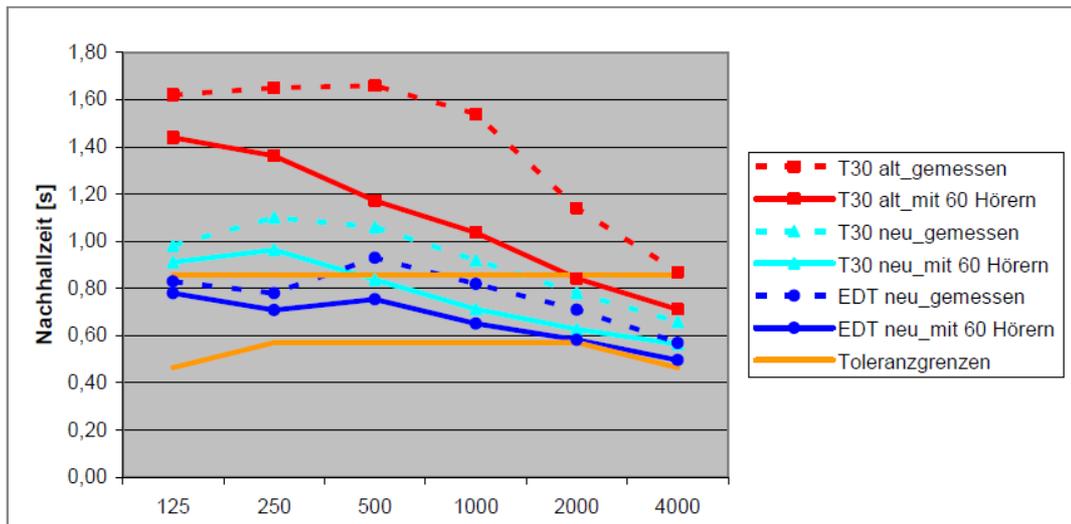


Abb. 102 Gemessene Nachhallzeiten nach den Sanierungsarbeiten

Die gemessenen Nachhallzeiten ohne Publikum sind strichliert dargestellt, die durchgezogenen Linien sind die Nachhallzeiten mit Berücksichtigung von 60 Personen. Deutlich erkennbar ist, dass sich die Nachhallzeit des leeren Raumes durch die zusätzliche äquivalente Absorptionsfläche des Publikums minimal verkürzt. Die Nachhallzeit mit 2/3 Besetzung des Hörsaales (hellblaue Kurve) erreicht ein Optimum in den höheren Frequenzbereichen und liegt innerhalb des Toleranzbandes. Bei 125 und 250 Hz wird jedoch die obere Toleranzgrenze geringfügig überschritten.

Literaturverzeichnis

- [1] ÖNORM EN ISO 3382. (2004). Akustik, Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Hinweis auf andere akustische Parameter.
- [2] Behr, S. (Mai 2004). Raumakustiksimulation mit Auralisation unter Verwendung von Catt Acoustic. Institut für Breitbandkommunikation TU-Graz, Graz: Projektarbeit für Elektrotechnik-Toningenieur.
- [3] Christoph Frank, B. D. (2007/2008). *Parametrierung von Raumimpulsantworten*. Abgerufen am Sept 2011 von www.iaem.at: http://www.iaem.at/kurse/sommer-08/aac2/Dokumentation_v2.pdf/view
- [4] DIN18041. (April 2004). „Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räume“.
- [5] Eggenschwiler, K. (2001). Holz in der Raumakustik. *EMPA/HSR-Tagung 2001*, (S. 8). CH-8600 Dübendorf.
- [6] Fasold, W. /. (1998). Schallschutz und Raumakustik in der Praxis,. Verlag für Bauwesen Berlin.
- [7] Franz Rametsteiner Gesmbh. (Stand:Juni 2011). www.trikustik.at.
- [8] Gamerith, O. U. (2000). *SCHALLSCHUTZ - AKUSTIK*. INSTITUT FÜR HOCH - UND INDUSTRIEBAU.
- [9] GmbH, Odenwald Faserplattenwerk. (Dez 2010). www.owa.de. Abgerufen am Sept 2011 von www.owa.de: www.owa.de
- [10]Graber, G. *Raumakustik Anhang B*. Institut für Breitbandkommunikation.
- [11]MiloEvid, M. A., & Cirid, D. G. (Oktober 1999). Averaging in Various Methods for Reverberation Time. NE, Yugoslavia.
- [12]Prof. Curdt, O. (01 2009). *Grundlagen der Raumakustik*. Abgerufen am 08 2011 von www.hdm-stuttgart.de/~curdt/_Raumakustik11.pdf.
- [13]Schricker, R. (2001). *Kreative Raum-Akustik*. DE.
- [14]W. Weselak, G. G. (WS 2009/2010). Skript zur Vorlesung „Raumakustik“,. Institut für Breitbandkommunikation –Technische Universität Graz .

Anhang A

Nach ÖNorm EN Iso 3382-2 (Informativ)

Besetzungszustände

Die in einem Raum gemessene Nachhallzeit wird durch die Anzahl der anwesenden Personen beeinflusst.

Die in Unbesetzter Zustand

Darunter versteht man den gebrauchsfertigen Raum, bereit für Sprecher oder ausführende Künstler und das Publikum, jedoch ohne Anwesenheit dieser Personen. Für Konzertsäle oder Opernhäuser ist das Vorhandensein von Gestühl für die Ausführenden, von Notenpulten und diversen Instrumenten usw. zu berücksichtigen.

Besetzter Zustand

Ein Auditorium oder Theater kann als "besetzt" angesehen werden, wenn 80% bis 100% der Sitzplätze besetzt sind.

Abklingkurve

Als Abklingkurve wird die zeitliche Abnahme des Schalldruckpegels an einem Ort in einem Raum nach Verstummen der Schallquelle bezeichnet. Dieser Abklingvorgang kann entweder nach dem tatsächlichen Abschalten einer kontinuierlich betriebenen Schallquelle im Raum gemessen oder aus einer Rückwärtsintegration der quadrierten Impulsantwort des Raumes abgeleitet werden.

Auswertung der Abklingkurve

Bei Messungen nach dem Verfahren des abgeschalteten Rauschens werden die Abklingkurven über den Bereich von 5 dB bis 35 dB unter dem Anfangspegel ausgewertet, um T_{30} und von 5 dB bis 25 dB unter den Anfangspegel ausgewertet, um T_{20} zu bestimmen.

In diesem Bereich ist die Kurve rechnerisch durch eine Gerade mit kleinster quadratischer Abweichung anzunähern, oder es wird, falls die Abklingkurve direkt durch mit einem Pegelschreiber aufgezeichnet wurde, von Hand eine Gerade so gut wie möglich an die Kurve angepasst. Die Neigung der Geraden ergibt die Pegelabnahme in dB/sec, woraus die Nachhallzeit errechnet wird.

Falls das Verfahren zur Bestimmung der Nachhallzeit darauf beruht, dass Pegelschreiber-Diagramme ausgewertet werden, so kann eine visuell bestimmte Linie bester Anpassung durch eine berechnete Regressionsgerade ersetzt werden. Diese ist jedoch nicht so zuverlässig wie eine Regressionsanalyse. Das zur Bestimmung der Pegelabnahme verwendete Verfahren ist im Prüfbericht anzugeben.

Der niedrigste Punkt im Messbericht muss einen ausreichenden Abstand vom Störsignal haben. Für Messungen von T_{30} muss der Störabstand mindestens 45 dB unter dem

Anfangspegel liegen. Bei Messungen über einen Bereich von 20 dB muss der Störabstand mindestens 35 dB niedriger als der Anfangspegel sein.

Auswertung der Abklingkurve

Für Messungen die nach dem Verfahren der integrierten Impulsantwort ausgeführt werden, muss die Aufzeichnung zwischen den Pegeln 5 dB unter dem integrierten Gesamtpegel bis wenigstens 25 dB unter diesem Pegel ausgewertet werden. Die ergibt einen Dynamikbereich für die Messung von mindestens 20 dB, jedoch sollte möglichst ein Bereich von 30 dB benutzt werden, und der Messbereich ist in jedem Falle im Bericht anzugeben. Zur Bestimmung der Neigung für die Ermittlung der Nachhallzeit ist eine Gerade nach dem Verfahren der kleinsten Quadrate anzupassen.

Räumliche Mittelung

Zur Bestimmung räumlicher Mittelwerte können die für den Bereich aller Quellen- und Mikrofonstellungen gemessenen Ergebnisse entweder für getrennt ausgewiesene Flächenbereiche oder für den Raum als Ganzes kombiniert werden. Diese räumliche Mittelung ist nach einem der beiden folgenden Verfahren vorzunehmen. Das benutzte Verfahren ist im Prüfbericht anzugeben.

Arithmetische Mittelung der Nachhallzeiten

Das räumliche Mittel wird erhalten, indem der Mittelwert der einzelnen Nachhallzeiten für alle wesentlichen Quellen- und Mikrofonstellungen gebildet wird. Die Standardabweichung kann zur Beurteilung der Genauigkeit und der räumlichen Varianz der Nachhallzeit bestimmt werden.

Prüfbericht

Im Prüfbericht ist anzugeben, dass die Messung in Übereinstimmung mit diesen internationalen Normen ausgeführt wurde. Der Bericht muss enthalten:

1. Name und Ort des untersuchten Raumes
2. Einen Grundriss des Raumes mit Maßstabsangaben
3. Das Raumvolumen (Anmerkung: Falls es sich nicht um einen vollständig geschlossenen Raum handelt, ist zu erläutern, wie das Raumvolumen definiert wird)
4. Bei Räumen für Sprach- und Musikdarbietung: Anzahl und Typ der Sitze. Angaben über Polsterungen mit Position, Dicke, Art und Material der Polsterung falls vorhanden
5. Eine Beschreibung des Materials der Wände und der Decke
6. Den Bezugszustand oder die Bezugs-Zustände während der Messung sowie An-Zahl der anwesenden Personen
7. Den Zustand einer veränderlichen Ausstattung wie Vorhänge, Beschallungsanlagen, elektronische Nachhallverlängerungs-Systeme usw.
8. Bei Theatern, ob der Sicherheits- und der normale Vorhang gehoben oder geschlossen waren
9. Falls zutreffend eine Beschreibung der Bühnenausstattung, evtl. einschließlich eines Konzertzimmeraufbaues usw.
10. Temperatur und rel. Feuchte im Raum während der Messung
11. Typ und Aufstellung der benutzten Schallquellen
12. Eine Beschreibung des verwendeten Schallsignals
13. Die gewählte Messpunktdichte, dazu Einzelheiten zu den Mikrofonstellungen, möglichst auf einer Grundskizze darstellen, mit den Höhen der Mikrofone
14. Eine Beschreibung der Messapparatur, der Schallquelle und der Mikrofone, Angabe, ob Tonbandaufzeichnungen verwendet wurden
15. Datum der Messung und Bezeichnung der Prüfstelle

Anhang B- Pläne

- **Plan 1: Grundriss**
- **Plan 2: Aufriss**
- **Plan 3: Variante A**
- **Plan 4: Variante B**
- **Plan 5: Variante C**
- **Plan 6: Schallreflexionen**