

Raumakustische Analyse und Simulation der Grazer Oper als Basis für die Planung von Verbesserungsmaßnahmen

Diplomarbeit

durchgeführt von

Markus Künstner

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation
der Technischen Universität Graz

Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gernot Kubin

Begutachter: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Graber

Betreuer: Dipl.-Ing. Thorsten Rohde

Graz, im Oktober 2011

Danksagung

Ich möchte mich recht herzlich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Thorsten Rohde bedanken, der mir mit seinem fachlichen Wissen und seiner Hilfsbereitschaft stets zur Seite gestanden ist und der durch seine Begeisterung zur experimentellen Raumakustik selbst aktiv bei der Entstehung dieser Diplomarbeit mitgewirkt hat. Des Weiteren gilt mein Dank auch Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Graber für die schnelle Beantwortung aller organisatorischen Fragen und für die Begutachtung dieser Arbeit.

Abschließend geht noch ein großer Dank an meine Eltern Lydia und Arnold, meine Schwester Natascha und an Katrin, die mich während meines Studiums unterstützt und immer wieder motiviert haben.

DANKE!

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)

Zusammenfassung

Diese Arbeit analysiert die akustische Situation der Grazer Oper und entwickelt Konzepte für deren Verbesserung. Neben den Grundlagen zur Schallausbreitung werden die für diese Arbeit relevanten, raumakustischen Parameter besprochen. Eine akustische Vermessung der Oper und die Anfertigung einer Simulation bilden den ersten Teil dieser Arbeit. Nach Analyse der raumakustischen Gegebenheiten wird im zweiten Abschnitt ein Maßnahmenkonzept entwickelt, bei dem es um die Verbesserung von akustischen Schwachpunkten unter Verwendung eines elektroakustischen Systems geht. Die praktische Umsetzung einer prototypischen Maßnahme sowie eine messtechnische Bestätigung der erfolgreichen Funktion des Konzepts bilden den Schlusspunkt.

Abstract

This work analyzes the acoustics of the Graz Opera House and develops improvement concepts. In addition to the basics of sound propagation, acoustic parameters are discussed with their relevance to this work. The first part of this work consists of an acoustical measuring of the opera house and the creation of a simulation model. After analyzing the acoustics in the second part, a concept is developed for the improvement of acoustic flaws by use of an electro-acoustic system. The practical implementation of a prototypical action and the confirmation of successful function using measurements, finalize this work.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	Motivation	8
1.2	Aufgabenstellung	9
1.3	Einteilung der Arbeit	10
2	Akustik von großvolumigen Gebäuden	12
2.1	Grundlagen der Schallausbreitung	12
2.2	Raumakustische Gütemaße und deren Bedeutung bei großvolumigen Gebäuden	21
3	Raumakustische Analyse der Oper	33
3.1	Raumakustische Vermessung	33
3.1.1	Maximum Length Sequence (MLS)	33
3.1.2	Messaufbau	34
3.1.3	Messmikrofonanordnung und Quellenpositionen	35
3.1.4	Ablauf der Messung	39
3.2	Auswertung der Messergebnisse	39
3.2.1	Nachhallzeit (RT)	40
3.2.2	Anfangsnachhallzeit (EDT)	44
3.2.3	Klarheitsmaß (C_{80})	47
3.3	Vergleich der Messdaten mit anderen Häusern	50
3.4	Akustische Situation und bekannte Probleme der Grazer Oper	53
4	Simulation und weiterführende Analyse	55
4.1	Beschreibung der Simulationssoftware EASE v4.1	55
4.2	Erstellung des Simulationsmodells	58
4.2.1	Geometrische Erfassung von Raumpunkten	58
4.2.2	Eingabe der Raumdaten	60
4.2.3	Zuweisung von Wandmaterialien/Wandstrukturen	62
4.2.4	Erstellen von Sitzflächen/Hörerflächen	63
4.2.5	Erstellen von Hörerplätzen/Kalibrierpositionen	63
4.3	Kalibrierung und erste Simulationsergebnisse	64
4.3.1	Simulationsergebnisse Parkett	66
4.3.2	Simulationsergebnisse Balkon	71
4.3.3	Simulationsergebnisse Galerie	74
4.4	Weitere Simulationsergebnisse und Analyse	78

4.4.1	Schalldruckpegelverteilung (TotalSPL)	78
4.4.2	Echo-Kriterium (Echo Speech/Echo Music)	82
4.4.3	Seitenschallgrad (LF)	85
4.4.4	Stärkemaß (G)	86
4.5	Vergleich der Simulationsdaten mit anderen Häusern	88
4.6	Zusammenfassung der raumakustischen Analyse	90
5	LARES	92
5.1	Grundlagen	92
5.2	Stabilität	93
5.3	Berechnungen zum Entwurf eines LARES-Systems	94
5.4	Zeitvarianz und dabei auftretende Probleme	95
5.5	LARES Beispiel – Elgin Theater in Toronto	95
6	Planung eines EA-Systems zur Klangoptimierung	99
6.1	Ideen zur Optimierung des Schallfeldes mittels einer EA-Anlage	99
6.2	Dimensionierung der Komponenten	102
6.2.1	Lautsprecher	103
6.2.2	Maximaler Mikrofonabstand zur Quelle	111
6.3	Konzeptplan	113
7	Aufbau, Inbetriebnahme und Bewertung eines limitierten EA-Systems	115
7.1	Aufbau des limitierten Systems	115
7.2	Einstellung der Komponenten und Probebeschallung	117
7.3	Akustische Messungen und Vorher/Nachher Vergleich	121
7.3.1	Impulsschall-Messmethode	122
7.3.2	Messaufbau	122
7.3.3	Messmikrofonanordnung und Quellenposition	122
7.3.4	Messtechnischer Vergleich ohne/mit RAK-System	123
7.4	Fazit zur Funktionalität des limitierten RAK-Systems	126
8	Zusammenfassung und Ausblick	127
8.1	Zusammenfassung	127
8.2	Ausblick	128
9	Anhang	129
9.1	Anhang A	129
9.1.1	RT-Werte des leeren und des voll besetzten Saals	129
9.1.2	RT/EDT Kurven zur Klassifizierung von Sitzplatzbereichen	130

9.1.3 Quellepositionen bei der weiterführenden Analyse	131
9.1.4 Nachhallzeitenvergleich ohne/mit RAK-System	132
10 Literaturverzeichnis	133

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Akustik von Neubauten – im speziellen die Raumakustik – wird durch fortlaufende Erneuerungen im Bereich der Simulationstechnik und der Planung immer besser. Auch die Entwicklung von innovativen Baumaterialien führt zu einer stetigen Verbesserung der raumakustischen Bedingungen. Doch was passiert eigentlich bei historischen Bauten, wo auf Grund des z.B. Denkmalschutzes keine nachträglichen, baulichen Veränderungen vorgenommen werden dürfen und wo oftmals eine nicht ganz so perfekte Akustik dem heutigen Stand der Technik angepasst werden sollte? In diesem Fall kann versucht werden mit elektroakustischen Beschallungssystemen einerseits die akustischen Defizite so weit als möglich auszugleichen, andererseits durch Einstellen gewisser raumakustischer Parameter ein gewünschtes Schallfeld zu erzeugen. Diese Technik dient nicht nur zur „akustischen Restaurierung“ von bereits bestehenden Gebäuden, sondern wird auch aktuell bei der Planung von multifunktionalen Aufführungsstätten mit einbezogen, um dort die akustische Situation dem jeweiligen Spielprogramm anpassen zu können.

Die Motivation für das Verfassen dieser Arbeit liegt im ersten Anwendungsbeispiel solcher elektroakustischen Systeme, wo es um die nachträgliche Verbesserung der akustischen Gegebenheiten geht. Als weiterer, besonderer Ansporn galt die Tatsache, dass es sich bei dem dieser Arbeit zu Grunde liegenden Gebäude um kein geringeres, als die Grazer Oper handelte. Da der Vorstand der Oper ständig darum bemüht ist seine Spielstätte weiter zu entwickeln, um somit attraktiv für das Publikum zu bleiben, werden immer wieder Erneuerungen bzw. Verbesserungen im Bereich der Akustik angesprochen und ausprobiert. Mit der Vergrößerung des Orchestergrabens in Richtung Parkett ging jedoch nach Aussage einiger Musiker ein wenig die akustische Brillanz und die Verschmelzung zwischen Orchester- und Bühnensound verloren. Eine Optimierung der akustischen Gegebenheiten sowie die Beseitigung des an manchen Stellen auftretenden Flatterechos¹ sind immer wieder im Gespräch und könnten mit einem gut geplanten RAK-System² wahrscheinlich beseitigt werden. Auch der Wunsch nach einer längeren Nachhallzeit wurde schon des Öfteren geäußert, jedoch steht man der Option

¹ Sind mindestens zwei starke Echos mit einer Periodizität von größer 50 ms bei Sprache und größer 80...100 ms bei Musik. [WEI] (siehe Kapitel 2.1)

² Wird ein elektroakustisches Beschallungssystem genannt, mit dem die Raumakustik (RAK) künstlich beeinflusst werden kann.

der elektroakustischen Verlängerung des Nachhalls durch Anhebung des Diffusschallfeldes³ mit Skepsis gegenüber, was aber nicht bedeutet, dass man einem Hörtest abgeneigt wäre!

Nach längerem Gespräch mit dem Tonmeister der Grazer Oper stellte sich heraus, dass in den frühen 70-er Jahren eine Tonanlage zur Verstärkung der Bühnensignale installiert war, bei der die Akteure auf der Bühne mit 4 Nahfeldmikrofonen abgenommen wurden und das verstärkte Summensignal über die in den 2 Deckenbögen eingelassenen, beinahe nicht sichtbaren 42 Lautsprecherchassis wiedergegeben wurde. Die Idee war es nun, diese Lautsprecher (LS) in die Planung eines elektroakustischen Beschallungssystems zur Verbesserung der raumakustischen Situation mit einzubeziehen.

1.2 Aufgabenstellung

In dieser Arbeit soll eine raumakustische Analyse der Grazer Oper durchgeführt und somit die Basis für die Planung von Verbesserungsmaßnahmen gelegt werden. Ein elektroakustisches Konzept zur Verbesserung der akustischen Situation (Echos und Schallfokussierungen verringern, Nachhallzeit verlängern) soll ausgearbeitet werden. Nach einer ausführlichen Literatur-Recherche am Anfang dieser Arbeit sind alle zur Durchführung dieser Diplomarbeit nötigen Grundlagen auszuarbeiten und thematisch zu erfassen. Neben den wichtigsten Gesetzen zur Schallausbreitung sollen die in der Arbeit vorkommenden raumakustischen Begriffe und Parameter erklärt und ein Zusammenhang zur Akustik von großvolumigen Gebäuden hergestellt werden. Anschließend ist eine raumakustische Vermessung der Grazer Oper durchzuführen, um für die Kalibrierung zwischen Simulation und wahren Raum die notwendigen Messwerte zu erhalten und um mit der Analyse der ersten Parameter beginnen zu können. Als Messmethode soll die MLS⁴-Korrelationsmethode eingesetzt werden, da diese aus heutiger Sicht als „Standard“ gilt. Danach ist für die weiterführende raumakustische Analyse ein Simulationsmodell der Grazer Oper mittels der Software EASE⁵ v4.1 zu erstellen und zu kalibrieren. Neben dem zweiten Teil der Analyse soll anhand des Modells zusätzlich untersucht werden, ob die Schallfokussierungen und Flatterechos auch in der Simulation sichtbar sind. Nach Abschluss der raumakustischen Analyse ist jene Beschallungsmethode zu erklären, auf Basis welcher die Idee zur Verbesserung der akustischen Defizite im Saal umgesetzt werden soll. Ein vollständiger Konzeptplan für die Grazer Oper mit Erklärung aller am System beteiligten Komponenten ist zu entwerfen und zu dimensionieren.

³ Wird jenes Schallfeld genannt, das durch Beugung und Reflexion von Schallwellen an Gegenständen bzw. Raumbegrenzungsflächen in größerem Abstand zur Quelle entsteht. [WEI] (siehe Kapitel 2.1)

⁴ MLS.....Maximum Length Sequence (Maximallängenfolge) (siehe Kapitel 3.1.1)

⁵ EASE..... Enhanced Acoustic Simulator for Engineers

1.3 Einteilung der Arbeit

Insgesamt besteht diese Arbeit aus 10 Kapiteln, die durch zahlreiche Unterteilungen in eine leichter lesbare Form gebracht wurden.

In der Einleitung (Kapitel 1) wird als erstes auf die Motivation (Kap. 1.1) dieser Arbeit eingegangen und jener Bereich angesprochen, der als zentrales Tätigkeitsfeld für diese Ausarbeitung in Frage kommt. Die Zielsetzung und ein vorläufiger Arbeitsplan werden unter Punkt 1.2 erwähnt, während in dem gerade vorliegenden Kapitel 1.3 eine grobe Einteilung der Arbeit dargestellt wird.

Kap. 2.1 beginnt mit einem Überblick über die wichtigsten Gesetze, die bei der Ausbreitung von Schall im Medium Luft von Bedeutung sind. Des Weiteren werden noch grundlegende Begriffe wie z.B. Schallquelle oder Diffusität erklärt. Das darauffolgende Kapitel 2.2 listet die in dieser Arbeit vorkommenden raumakustischen Parameter und Fachausdrücke auf, erläutert deren Bedeutung bei großvolumigen Gebäuden und stellt Wertevorgaben für eine „gute“ Akustik dar.

Im 3.Kapitel wird unter Punkt 3.1 die raumakustische Vermessung der Grazer Oper durchgeführt. Es werden die Methode, der Aufbau und alle zur Durchführung der Messung benötigten Schritte beschrieben. In dem Folgenden ersten Teil der Analyse (Kap. 3.2 und 3.3) galt es die Parameter Nachhallzeit, Anfangsnachhallzeit und Klarheitsmaß auszuwerten und mit den Werten anderer Opernhäuser zu vergleichen. Eine Auflistung der empirisch bekannten, akustischen Probleme der Oper und damit verbundene Verbesserungsvorschläge bilden den Schlussteil dieses Kapitels (Kap.3.4).

Die Anfertigung eines computerbasierten Simulationsmodelles und die weiterführende Analyse ist Bestandteil von Kapitel 4 und beginnt mit der Beschreibung der Software EASE v4.1 (Kap. 4.1). Unter Punkt 4.2 wird die komplette Erstellung des Modells detailliert beschrieben. Die Kalibrierung der Simulation anhand der Messergebnisse aus Kapitel 3 ist Teil von Kapitel 4.3 und sorgt dafür, dass das Modell akustisch gesehen näher an den „wahren“ Raum angepasst wird. In Kapitel 4.4 wird mit dem Simulationsmodell die raumakustische Analyse fortgesetzt und versucht, einige der in der Oper bekannten akustischen Probleme auch „virtuell“ sichtbar zu machen. In der abschließenden Gegenüberstellung der Simulationsdaten zu den Messwerten anderer Aufführungsstätten wird gezeigt, wo die Werte der Grazer Oper im Vergleich dazu liegen.

Das kurze Zwischenkapitel 5 fasst die Funktion der LARES⁶-Methode zusammen, da auf deren Grundlage die Planung des unter Kapitel 6 erstellten Konzeptes basiert. Neben der Funktionsweise (Kap.5.1) werden die Themen Stabilität (Kap. 5.2), Berechnungen zum Entwurf von LARES-Systemen (Kap.5.3) und die Zeitvarianz und deren Probleme (Kap.5.4) angesprochen. Zum Schluss wird am Beispiel des Elgin Theaters in Toronto eine praktische Umsetzung näher vorgestellt (Kap.5.5).

Die Planung eines EA-Systems zur Klangoptimierung ist Bestandteil des Kapitels 6. Am Beginn werden die Ideen zur Optimierung des Schallfeldes beschrieben (Kap. 6.1), bevor in

⁶LARES..... Lexicon Acoustic Reinforcement and Enhancement System

Abschnitt 6.2 alle am System beteiligten Komponenten richtig dimensioniert, die Verkabelung geplant und die benötigten Berechnungen abgehandelt werden. Ein zusammenfassender Konzeptplan erläutert unter Kapitel 6.3 nochmals die Funktionen der einzelnen Teilsysteme und veranschaulicht bildlich den Aufbau der gesamten Anlage.

In Kapitel 7 wird eine prototypische Maßnahme zur Reduzierung der unerwünschten Flatterechos umgesetzt. Auf Grund des zeitlich begrenzten Rahmens wurde ein limitiertes System der unter Kapitel 6 geplanten Beschallungsanlage aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Installation sowie die Verkabelung der Anlage wird in Kapitel 7.1 erklärt. Danach folgen die Einstellung der Komponenten und die Probebeschallung (Kap. 7.2). Mit dem messtechnischen Vergleich zwischen den Raumimpulsantworten⁷ – mit und ohne RAK-System – und mit einem Fazit zur Qualität der Installation endet der praktische Teil dieser Diplomarbeit.

Das achte Kapitel beinhaltet eine Zusammenfassung der Arbeit und einen Ausblick mit Ideen zur weiteren Verwendung des erstellten Simulationsmodelles bzw. zur Fortsetzung dieser Arbeit.

Der Anhang, Kapitel 9, zeigt ergänzende Messergebnisse, Messvergleiche sowie Abbildungen und Tabellen, die als zusätzliche Informationsquelle dienen sollen.

Im abschließenden Kapitel 10 befindet sich ein Literaturverzeichnis mit Angabe aller in dieser Arbeit zitierten Autoren, Werke und Internetadressen.

⁷ Als Raumimpulsantwort wird die zeitliche Folge von Schallrückwürfen eines Raumes bezeichnet. (siehe auch Kap. 2.1)

2 Akustik von großvolumigen Gebäuden

In diesem einführenden Kapitel werden die Grundlagen der Schallausbreitung und die damit eng verbundenen raumakustischen Gesetze und Parameter zusammengefasst und erläutert. Ein spezielles Augenmerk wird dabei auf den Zusammenhang zu großvolumigen Gebäuden gelegt. Mit den Informationen aus Kapitel 2 soll einerseits die raumakustische Analyse durchgeführt und andererseits die Basis zum Erfassen der in dieser Arbeit entworfenen Konzepte geschaffen werden.

2.1 Grundlagen der Schallausbreitung

Schall entsteht, wenn eine Geräuschquelle die uns umgebende Luft in Schwingung versetzt. Dies geschieht dadurch, indem das elastische Medium Luft abwechselnd zusammengedrückt und wieder entspannt wird. Überlagert sich dieser Prozess mit dem uns stetig umgebenden Luftdruck, so kommt es zu einer wellenförmigen Fortpflanzung des Schalls. Gelangt diese Druckwelle zu unserem Ohr, wird das Trommelfell in Schwingung versetzt und dies führt in weiterer Folge zu einem Hörereignis. Umso stärker die Verdichtung und Entspannung im Medium Luft ist, desto lauter empfindet der Mensch das Geräusch. Die Frequenz des Luftschalls beschreibt, wie oft dieser Verdichtungs- und Entspannungsprozess pro Sekunde stattfindet. Sie wird in Hertz, mit der Einheit 1/s, angegeben. Generell ist das menschliche Hören auf einen Frequenzbereich von 20Hz – 20kHz beschränkt. [SCHOE]

Wenn sich nun diese hörbaren Schallwellen von Musik, Sprache oder Geräuschen ausbreiten und auf Hindernisse treffen, kommt es zur Reflexion, Absorption, Zerstreuung oder Beugung von Schallwellen. In diesem dadurch entstandenen „gestörten“ Schallfeld bildet sich neben dem Direktschallfeld (Primärschallfeld) auch ein Diffusschallfeld (Sekundärschallfeld) aus, welches hauptsächlich durch die Reflexion des Direktschalls an Begrenzungsflächen entsteht [RAK]. Im Folgenden werden die wichtigsten Begriffe der Raumakustik kurz erklärt und teilweise mit Beispielen unterlegt:

Schallquellen

Als Schallquellen werden jene akustischen Sender bezeichnet, die eine Umwandlung von mechanischer bzw. elektrischer Energie in Schallenergie durchführen können. Bei einem Großteil der Schallquellen wird durch die Aufbringung von mechanischer Energie durch den Menschen, Schall erzeugt. Elektronische Musikinstrumente und Lautsprecher nutzen diejenige Energieumwandlung, bei der elektrische- in Schallenergie umgesetzt wird. [JUN]

Reflexion Allgemein

Unter Reflexion – im Bereich der Akustik – versteht man im Allgemeinen das Zurückwerfen einer Schallwelle von einer Oberfläche. Je nachdem, ob es sich bei der Reflexionsfläche um eine ebene oder gekrümmte Fläche handelt, gehorchen die Strahlen dabei entweder dem physikalischen Reflexionsgesetz oder dem Gesetz der Reflexion an Streu- und Hohlspiegeln. [JUN][WEI]

Reflexion an ebenen Flächen

Bei der Wellenausbreitung durch senkrechte Strahlen zur Wellenfront und bei ebenen, schallharten⁸ Flächen gilt das soeben bei der allgemeinen Reflexion erwähnte physikalische Reflexionsgesetz, das lautet: Einfallswinkel ist gleich Ausfallswinkel, wobei die Strahlen in der gleichen Einfallsebene liegen müssen. Mit einer durchdachten Ausrichtung der reflektierenden Flächen ist es somit möglich den Schallstrahl in eine bestimmte Richtung zu lenken. Diese Tatsache findet vor allem in der raumakustischen Gestaltung seine Anwendung. [JUN]

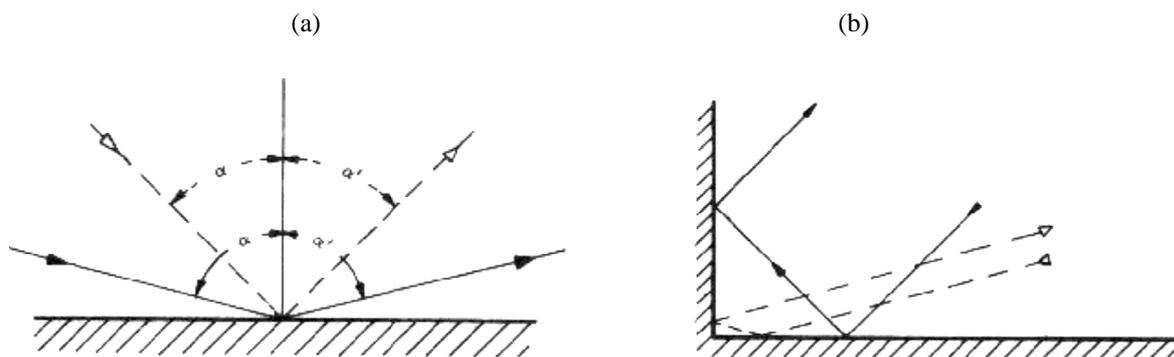


Abb. 2.1: Schallreflexion an ebenen Flächen: (a) an einer geraden Fläche, (b) an einer Ecke [JUN]

Stehende Wellen

Zur Ausbildung von stehenden Wellen kommt es dann, wenn zwischen zwei parallelen, stark reflektierenden Wänden eine Schallwelle immer wieder hin und her geworfen wird. Bei der dadurch entstandenen Überlagerung kommt es je nach Phasenlage der hin- bzw. rücklaufenden Schallwelle zu Auslöschungen (gegenphasig) oder Überhöhungen (gleichphasig). Eine Bedingung für das Auftreten von stehenden Wellen ist jene, dass der Abstand der beiden parallelen Flächen gleich der halben Wellenlänge oder einem

⁸ Ein Material, bei dem ein Großteil der auftreffenden Schallenergie ohne Absorption zurückgeworfen wird, bezeichnet man als „schallhart“.

ganzzahligen Vielfachen der anregenden Frequenz sein muss. Stehende Wellen sind vor allem in der Raumakustik ein großes Thema und äußern sich häufig in sogenannten Raummoden. [JUN]

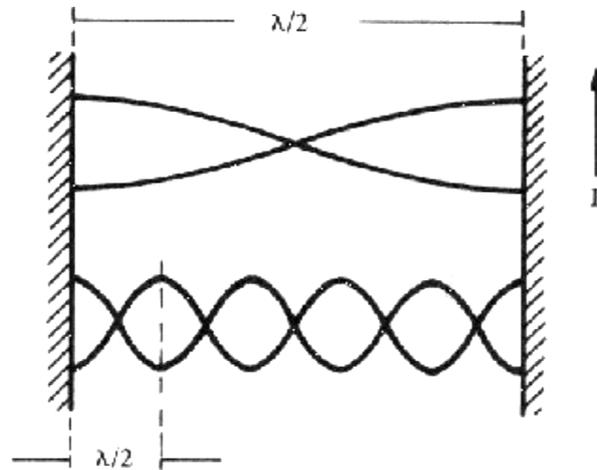


Abb. 2.2: Ausbreitung einer stehende Welle zwischen zwei schallharten Wänden [JUN]

Reflexion an gekrümmten Flächen

Kommt es im Zuge der Schallwellenausbreitung zu einer Reflexion an einer konkaven Fläche (nach innen gewölbte Fläche), so müssen mit denen aus der Optik bekannten Gesetzen der Reflexion an Streu- und Hohlspiegeln vier verschiedene Fälle unterschieden werden[JUN]:

1. Der Abstand zwischen Schallquelle und konkaver Fläche ist größer als der halbe Krümmungsradius $r/2$, jedoch kleiner als r : Außerhalb des Krümmungsradius wird die gesamte reflektierte Schallenergie in einem Punkt gesammelt. [JUN]

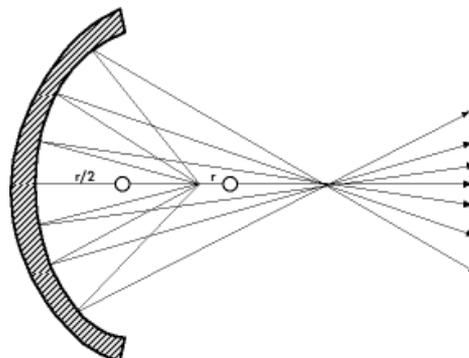


Abb. 2.3: Reflexion an einer konkaven Fläche; Fall 1 [DMA]

- Der Abstand zwischen Schallquelle und konkaver Fläche ist gleich dem halben Krümmungsradius $r/2$: Nach der Reflexion kommt es zu einem parallelen Verlauf der Schallstrahlen. [JUN]

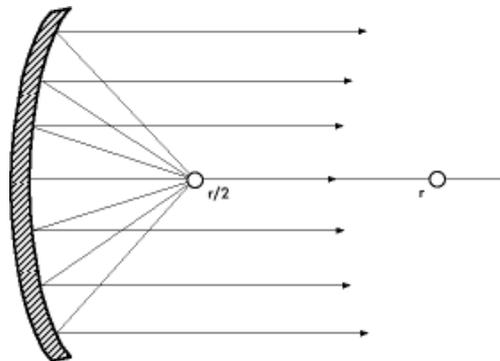


Abb. 2.4: Reflexion an einer konkaven Fläche; Fall 2 [DMA]

- Der Abstand zwischen Schallquelle und konkaver Fläche ist kleiner als der halbe Krümmungsradius $r/2$: Diese Anordnung führt dazu, dass die Schallstrahlen nach der Reflexion zerstreut auseinander laufen. [JUN]

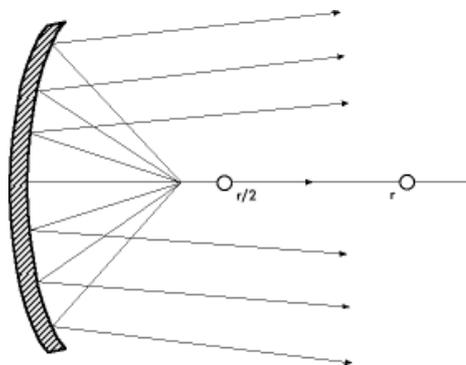


Abb. 2.5: Reflexion an einer konkaven Fläche; Fall 3 [DMA]

4. Der Abstand zwischen Schallquelle und konkaver Fläche ist größer als der Krümmungsradius r : Auch in diesem Fall ergibt sich eine zerstreue Wirkung, die noch stärker ist, als im Fall zuvor.

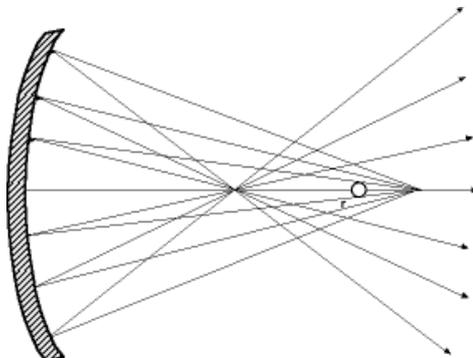


Abb. 2.6: Reflexion an einer konkaven Fläche; Fall 4 [DMA]

Konvexe Flächen haben unabhängig vom Abstand zwischen Schallquelle und Reflexionsfläche immer zerstreue Wirkung. [JUN]

Raumimpulsantwort

Als Raumimpulsantwort wird die zeitliche Abfolge von Schallrückwürfen eines Raumes bezeichnet. Dabei wird mit einem Schallimpuls (älteres Verfahren) der Raum angeregt und die an einem Zuhörerort eintreffenden Reflexionen in Form eines Schalldruckpegelverlaufs aufgezeichnet. Aus der Verteilung dieser Schallrückwürfe lassen sich nun Aussagen über die akustische Situation des Raumes machen. Mit der Raumimpulsantwort kann das Schallfeld theoretisch vollständig beschrieben werden [BNW1]. Dabei ist anzumerken, dass in einem Raum für jede Kombination zwischen Sender-Empfänger eine eigene Raumimpulsantwort existiert.

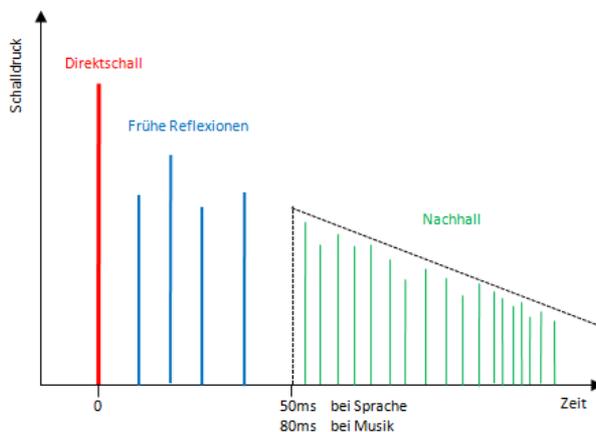


Abb. 2.7: Beispiel einer Raumimpulsantwort

Frühe Reflexionen und Nachhall

In der Raumakustik werden jene Anteile des reflektierten Schalls, welche unter ca. 50ms (Sprache) bis 80ms (Musik) nach dem Direktschall bei einem Zuhörer eintreffen, als „Frühe Reflexionen“ bezeichnet (siehe auch Abb. 2.7). Da das menschliche Gehör in der Lage ist, auch von frühen Reflexionen noch die Richtung bestimmen zu können, wird ihnen in der Akustik ein sehr hoher Stellenwert beigemessen. Neben der Erhöhung des subjektiven Lautstärkeindrucks und der Sprachverständlichkeit tragen die „Early Reflections“ auch wesentlich zum Raumeindruck bei. Frühe laterale Reflexionen, die in einem Zeitbereich von 10-50ms nach Ende eines Schallereignisses beim Hörer eintreffen, sind für das Entstehen dieses räumlichen Eindruckes verantwortlich. Nach 50-80ms kann das Ohr die Reflexionen nicht mehr der direkten Schallwelle zuordnen und dies führt nur mehr zu einem „Verwischen“ des Klangeindrucks bzw. der Nachhall setzt ein. [OGS][BT][GRIE2]

Spezielle Reflexionseffekte

Sind mehrere reflektierende Flächen in einer allgemeinen oder speziellen Anordnung vorhanden, so kann es zu folgenden Höreindrücken kommen:

- **Echos**

Die Ursache für Echos liegt in der Tatsache, dass zu starke Reflexionen in einem Zeitbereich über ca. 50ms (bei Sprachsignalen) bzw. 80ms (bei Musik) nach dem Direktschall beim Hörer eintreffen und diese dann vom Ohr subjektiv als separate Schallereignisse wahrgenommen werden [WEI]. Am Beispiel der Raumimpulsantwort eines großen Gebäudes mit Bühnenhaus soll dieser störende Effekt auch bildlich sichtbar gemacht werden (Abb. 2.8).

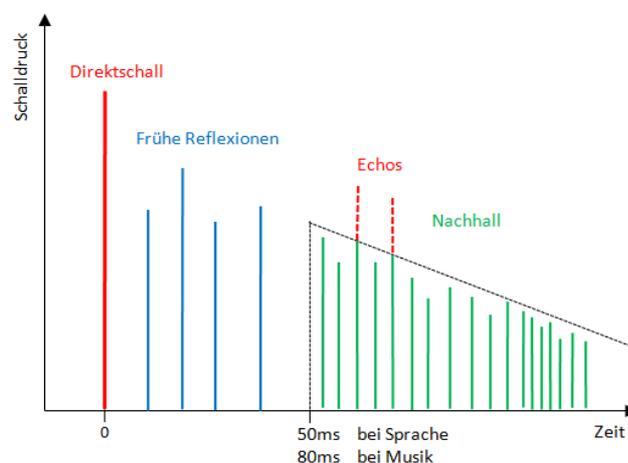


Abb. 2.8: Raumimpulsantwort eines Saales mit Echos

- **Flatterecho**

Bei zwei gegenüberliegend angeordneten, schallharten Flächen kann es zu mehreren hörbaren Reflexionen kommen. Ist innerhalb dieser Echos die Periodizität von mindestens 50ms bei Sprache und 80 bis 100ms bei Musik vorhanden, so werden diese als Flatterechos wahrgenommen [WEI]. Abb. 2.9 zeigt die Raumimpulsantwort für ein großes Gebäude mit Bühnenhaus, in dem ein Flatterecho auftritt.

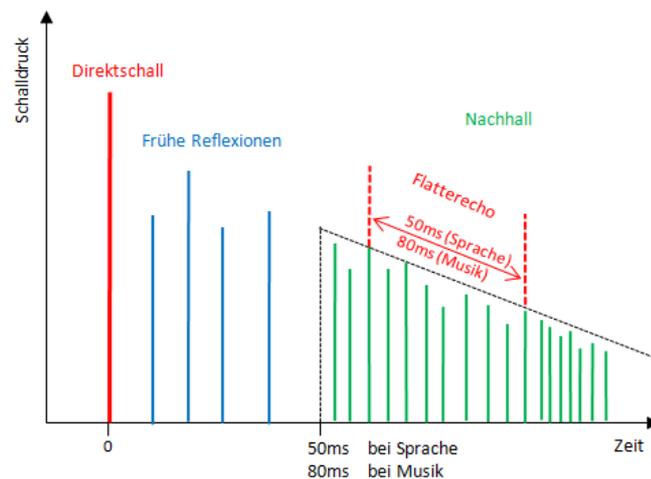


Abb. 2.9: Raumimpulsantwort eines Saales mit Flatterecho

Schallbeugung

Ist die Wellenlänge einer Schwingung ähnlich groß einem Hindernis, so kommt es zur sogenannten akustischen Beugung. Ein Objekt, welches deutlich kleiner ist als die Wellenlänge des auftreffenden Schalls, ist nicht in der Lage die Wellenfront merklich zu beeinflussen. Abb. 2.10 sagt aus, dass wenn die Wellenlänge des Hörschalls zwischen ca. 2cm und 20m liegt, es im Allgemeinen in einem aus vielen Teilfrequenzen bestehenden Geräusch auch tieffrequente Schallanteile geben wird, die um das Hindernis herum gebeugt werden. Höherfrequente Anteile werden hingegen von dem Hindernis reflektiert, gelangen also nicht um das Objekt herum und es entsteht ein Schallschatten. Aus diesem Grund wird ein komplex zusammengesetzter Klang durch ein Hindernis, das sich zwischen Schallquelle und Hörer befindet, klanglich dumpfer (lineare Verzerrung). Abb. 2.10 zeigt außerdem, dass an einer Kante eine Schallwelle in den Schallschatten hinein gebeugt wird und zwar umso stärker, je tiefer die Frequenz ist. [JUN]

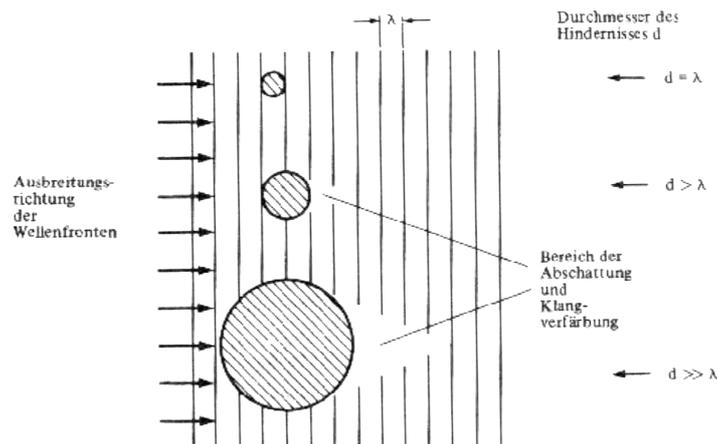


Abb. 2.10: Schallbeugung an Objekten unterschiedlicher Größe [JUN]

Absorption

Absorption nennt man jenen Vorgang, bei dem eine Schallwelle auf einen weichen, verformbaren oder porösen Körper trifft und die Schallenergie ganz oder nur teilweise „geschluckt“ (absorbiert) wird. Bei der dabei auftretenden Energieumwandlung wird Wärme freigesetzt. Bei homogenen Schallschluckstoffen erfolgt diese Umwandlung von Schallenergie durch innere Reibung (Deformation des Materials). Bei porösen Materialien sorgt die äußere Reibung für die Energietransformation (Reibung zwischen den schwingenden Partikeln des Schallausbreitungsmediums und den Skelettelementen des porösen Materials). Der Parameter, der über die Fähigkeit eines Materials Schall zu „schlucken“ Auskunft gibt, wird Absorptionsgrad genannt. Er gibt das Verhältnis von absorbierte Schallintensität zu einfallender Schallintensität an. Des Weiteren ist er frequenzabhängig und hängt im Wesentlichen von der Zusammensetzung und Dicke des Materials ab. Auch die Größe spielt eine entscheidende Rolle, denn kleine Objekte sind kaum in der Lage tiefe Frequenzen zu absorbieren. Die Werte für den Absorptionsgrad spielen sich in einem Bereich zwischen 1 (totale Absorption) und 0 (keine Absorption) ab. [JUN]

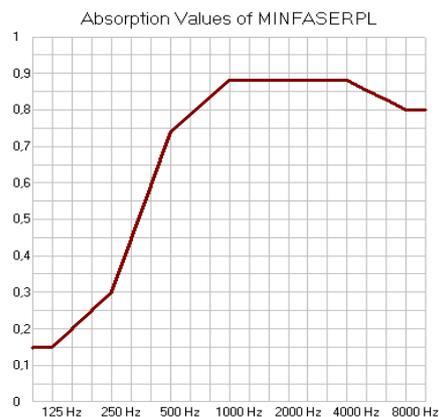


Abb. 2.11: Bsp. des Absorptionsverlaufes einer Mineralfaserplatte (4 cm Dicke; direkt an der Wand)

Diffusität

In der Akustik wird unter Diffusität die gleichmäßige Verteilung von reflektierter Schallenergie verstanden. Dies geschieht dadurch, indem Reflexionen an bestimmten Flächen in sehr viele verschiedene Richtungen zerstreut werden (siehe auch Reflexion an konkaven und konvexen Flächen). Werden musikalische Klänge oder Sprache über eine große Zuhörerfläche gut vermischt wahrgenommen, so kann man von einer hohen Diffusität im Raum ausgehen. Als weiterer Vorteil von hoher Diffusität sei zu nennen, dass Echos und starke Reflexionen nicht so stark hervortreten werden, was sonst nur durch zusätzliche Absorptionsmaßnahmen möglich wäre. Der Effekt der „Zerstreuung“ wird auch noch zur Erzeugung von künstlicher „Größe“ in der Raumakustik eingesetzt. Es werden dabei kleinere Räume mit hohem Diffusschallanteil gebaut, um einen Konzertsaalklang, oder die damit verbundene Atmosphäre, erzeugen zu können. [JUN]

Häufig wird bei der Definition von Oberflächenstrukturen mit dem Parameter „Diffusität“ die Fähigkeit eines Materials, Schall zu zerstreuen angegeben. Stark strukturierte Wandflächen besitzen eine höhere Diffusität als glatte Oberflächen.

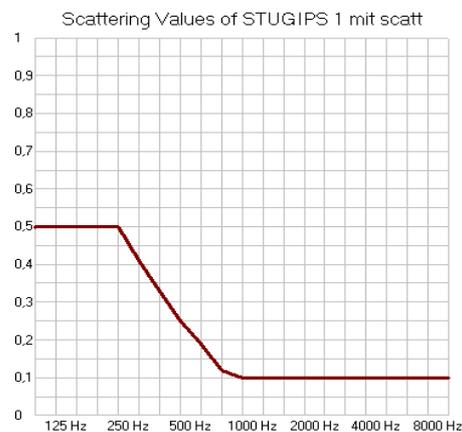


Abb. 2.12: Bsp. des Frequenzverlaufs der Diffusität einer Balkonfront (Material = Stuckgips)

2.2 Raumakustische Gütemaße und deren Bedeutung bei großvolumigen Gebäuden

In diesem Unterkapitel werden jene raumakustischen Gütemaße aufgelistet und erklärt, welche von relevanter Bedeutung für großvolumige Gebäude sind. Des Weiteren wird ein Bezug zwischen diesen Parametern und der Akustik von Opern- und Konzerthäusern hergestellt und einige auf Evidenz basierende Richtwerte für eine „gute“ Akustik angeführt.

Nachhallzeit (RT^9)

Betrachtet man ein Schallenergiepaket bei der Ausbreitung in einem Raum so kann festgestellt werden, dass die Energie durch jede Reflexion an einer Absorptionsfläche um ein gewisses Maß abnehmen wird. Jene Zeitspanne die es dauert, bis ein mit einer bestimmten Stärke eingebrachter Schall auf den tausendsten Teil seines Schalldruckes (-60dB) abgeklungen ist, nachdem die Schallquelle plötzlich abgeschaltet wurde, wird Nachhallzeit genannt. Sind das Volumen (V), die Raumbegrenzungsfläche (S_{ges}) und der mittlere Absorptionsgrad ($\bar{\alpha}_m$) eines Raumes bekannt, so kann die Nachhallzeit wie folgt berechnet werden[CRE]:

Nachhallzeitformel nach EYERING

$$RT = 0.161 \left[\frac{s}{m} \right] \cdot \frac{V}{-S_{ges} \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}_m)} \quad (2.1)$$

Bei kleinen und mittleren Schallabsorptionsgraden ($\alpha < 0,3$) lässt sich der Ausdruck $\ln(1 - \bar{\alpha}_m)$ durch $-\bar{\alpha}_m$ annähern, wodurch die EYRINGsche Nachhallzeitformel in jene von SABINE übergeht. [RAK]

Nachhallzeitformel nach SABINE

$$RT = 0.161 \left[\frac{s}{m} \right] \cdot \frac{V}{S_{ges} \cdot \bar{\alpha}_m} \quad (2.2)$$

⁹ engl.: Reverberation Time

Eine genauere Methode zur Bestimmung der Nachhallzeit ist die Messung. Hierbei wird mittels eines Impulses oder breitbandigen Rauschens der Raum angeregt und die Raumimpulsantwort aufgezeichnet. Durch Rückwärtsintegration der quadrierten Raumimpulsantwort in jedem Terz- oder Oktavband lässt sich die Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Frequenz bestimmen. Eine wesentlich modernere Messmethode ist z.B. die MLS-Korrelationsmethode, deren Funktionsweise unter Kapitel 3.1.1 beschrieben wird.

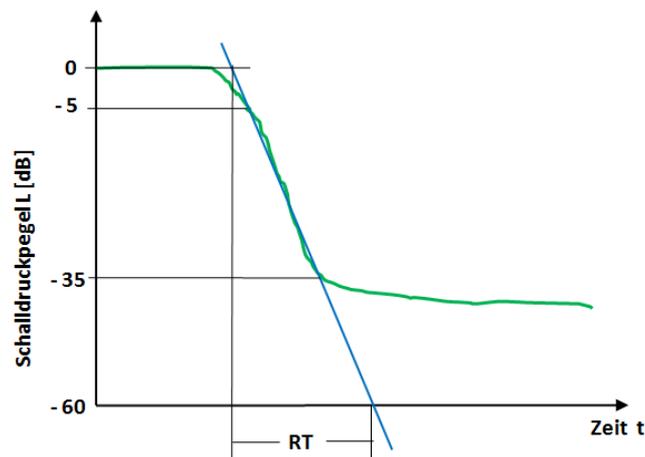


Abb. 2.13: Nachhallzeit RT; bestimmt durch die Messung von 30dB Abfall

Wie aus Abb. 2.13 ersichtlich, ist die Messung von 60dB Schalldruckabfall oft nicht realisierbar (Signal-Störabstand von mindestens 60dB erforderlich). Es haben sich in der Messtechnik deshalb noch weitere Methoden entwickelt, bei denen nicht der ganze 60dB Abfall gemessen wird, sondern nur die ersten 20, 25 oder 30dB. Für die Bestimmung der „wahren“ Nachhallzeit müssen diese Ergebnisse auf -60dB extrapoliert werden [RAK].

Die Erkenntnis, dass die gemessene Dauer eines Abklingvorganges im ganzen Raum „annähernd“ gleich groß ist, ließ die Nachhallzeit zu einer für den Planungsprozess und der Analyse von Aufführungsstätten wichtigen Größe avancieren [CRE]. Während sich das Verhalten des Nachhalls auf das klanglich-ästhetische Empfinden eines Zuhörers auswirkt (große Nachhallzeit bedeutet gute Klangdurchmischung vs. kleine Nachhallzeit für gute Sprachverständlichkeit), geben die örtlichen Unterschiede in der Nachhallzeit Aufschluss über die Homogenität innerhalb eines Raumes. Durch die Betrachtung der frequenzabhängigen Nachhallkurven lassen sich die Klangeigenschaften eines Raumes beurteilen und einige aus der Psychoakustik bekannten subjektiven Attribute der Hörwahrnehmungen bestätigen oder widerlegen. Abb. 2.14 sowie Tab. 2.1 zeigen Beispiele für die frequenzabhängige Verteilung der Nachhallzeiten und den damit verbunden subjektiven Hörerfahrungen.

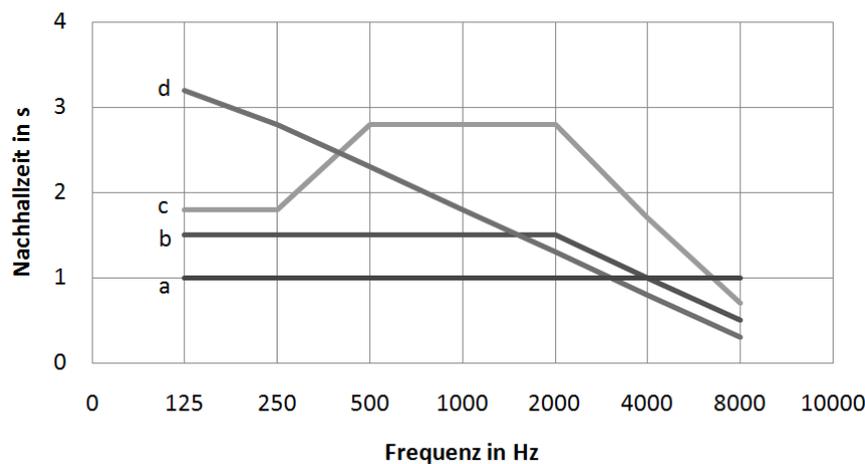


Abb. 2.14: Beispiel der frequenzabhängigen Verteilung der Nachhallzeiten: (a) unnatürlich heller Raumklang; (b) neutraler Raumklang; (c) mittenbetonter Raumklang; (d) dumpfer Raumklang [JUN02]

Tab. 2.1: Frequenzabhängige Verteilung der Nachhallzeiten und subjektive Hörwahrnehmung

Subjektive Hörwahrnehmung	Frequenzabhängige Verteilung der Nachhallzeiten
warm	Genügend lange RT im Bassbereich (250 -500Hz)
hallig	Größere RT im mittel- und höherfrequentem Bereich (> 350Hz)
kalt	Zu geringe RT im Bassbereich im Vergleich zu den Mitten und den Höhen
neutral	Ausgewogene Verteilung der Nachhallzeiten über dem ganzen Hörbereich mit leichter Abnahme zu den Höhen hin
brillant	Genügend lange RT bei höheren Frequenzen
dunkel	Zu geringe RT bei hohen Frequenzen im Vergleich zu tiefen

Neben der klangspezifischen Verteilung der Nachhallzeiten sind vor allem die Größe und der Verwendungszweck der Aufführungsstätte für die optimale Nachhalldauer verantwortlich. Besonders die Art und Geschwindigkeit der gespielten Werke entscheiden oft darüber, ob ein Stück noch differenziert wahrgenommen werden kann, oder ob z.B. eine zu lange Nachhallzeit bereits zum „Verwischen“ des Klanges führt. In Abb. 2.15: Zusammenhang zwischen Raumgröße, Verwendungszweck und optimaler mittlerer Nachhallzeit (T_m bei 500 bis 1000Hz) [SUR] wird dieser Zusammenhang zwischen Raumgröße, optimaler mittlerer Nachhallzeit und Verwendungszweck dargestellt.

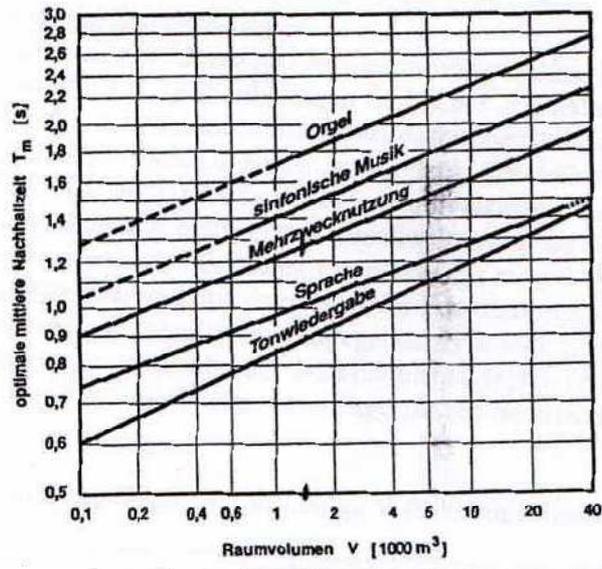


Abb. 2.15: Zusammenhang zwischen Raumgröße, Verwendungszweck und optimaler mittlerer Nachhallzeit (T_m bei 500 bis 1000Hz) [SUR]

Beranek [BER] analysierte und bewertete in seinem Werk die Akustik von 76 Konzert- und Opernhäuser und versuchte zusammen mit Musikern, Kritikern und Aufnahmetechnikern Vorgaben für eine optimale mittlere Nachhallzeit (RT_{mid}^{10}), in Abhängigkeit von der gespielten Musik, zu treffen. Wie man in Tab. 2.2 sehen kann, sind die Vorgaben für konzertante Musikdarbietungen um ca. 0,5 Sekunden höher angesetzt, als für Opern. Diese Tatsache beruht auf der Notwendigkeit einer höheren Sprachverständlichkeit bei Opern- bzw. Sprechgesang.

Tab. 2.2: Optimale mittlere Nachhallzeit in Abhängigkeit von der gespielten Musik

Art der Musik/Art des Hauses	Optimale RT_{mid}
durchschnittliches sinfonisches Orchester Repertoire	1,8 bis 2,0 Sekunden
durchschnittliches sinfonisches Orchester: speziell Barock und Klassik	1,6 bis 1,8 Sekunden
Sinfonische Musik/Konzertsaal	1,9 bis 2,0 Sekunden
Konzertmusik/Konzertsaal	1,8 bis 2,0 Sekunden
Oper/Opernhaus	1,3 bis 1,5 Sekunden

¹⁰ RT_{mid}gemittelte Nachhallzeit bei 500 bis 1000Hz; besetzter Zustand

Anfangsnachhallzeit (EDT)

Die Anfangsnachhallzeit (Early Decay Time) kommt dem subjektiv empfundenen Nachhall näher, weil der anfängliche Teil des Abklingvorganges besser wahrgenommen wird, als der gesamte 60dB Abfall. Zur Bestimmung der EDT wird der Schalldruckabfall von 0 auf -10dB gemessen und anschließend auf -60dB extrapoliert (zu sehen in Abb. 2.16). [BT][HDT]

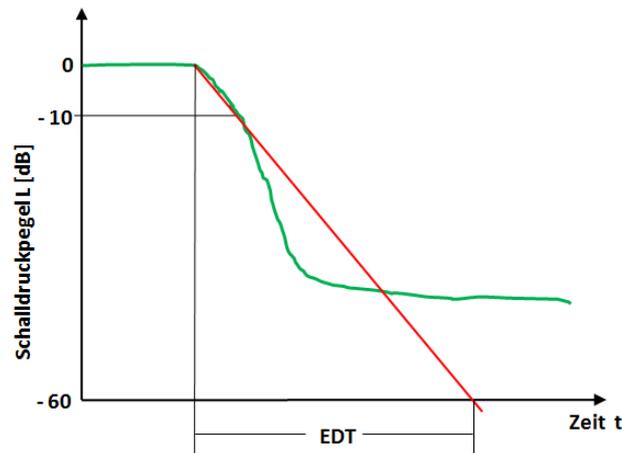


Abb. 2.16: Anfangsnachhallzeit EDT

Da die Anfangsnachhallzeit sehr stark vom Ort abhängig ist und eventuell auftretende Raumresonanzen eine Beeinflussung des Abfalls bewirken können, ist sie nur bedingt für eine allgemeine Beurteilung der akustischen Qualität tauglich, weshalb die EDT hauptsächlich zur Klassifizierung von Sitzplatzbereichen eingesetzt wird [BT][HDT]. Ein Hörerplatz wird dann als akustisch „gut“ bezeichnet, wenn die Anfangsnachhallzeit im Vergleich zur „normalen“ Nachhallzeit höher ist. Im Zuge der Beobachtungen von Beranek [BER S.504ff] ergaben sich noch weitere Erkenntnisse betreffend der Anfangsnachhallzeit:

- Die EDT verändert sich mit dem Besetzungszustand deutlich weniger, als die RT. Dieser Effekt ist vor allem bei großen Sälen (über 1500 Sitzplätze) bemerkbar, da dort am Anfang des Abklingvorganges weniger Reflexionen von den Zuhörerflächen in das Messergebnis einfließen.
- Der Vergleich von als akustisch hervorragend bewerteten Sälen (mit gepolsterten Sitzen) ergab, dass die EDT_{mid}^{11} im Schnitt um 0,2 Sekunden höher ist, als die RT_{mid} . Sind z.B. keine Messwerte für die Nachhallzeit im besetzten Zustand vorhanden, so kann durch Subtraktion von 0,2s von den EDT Zeiten die RT ansatzweise geschätzt werden.
- Im selben Vergleich zeigte sich außerdem, dass die Streuung bei den gemessenen EDT-Werten geringer ist, als bei den RT-Werten.

¹¹ EDT_{mid} gemittelte EDT bei 500 und 1000Hz; unbesetzter Zustand

- Eine größere EDT kann durch Anheben der Diffusität erreicht werden (z.B. Diffusität eines Wandmaterials erhöhen durch Anbringen von Stuckverzierungen, Ornamenten, Erhebungen/Vertiefungen, etc.).

Als Vorgabe für eine exzellente Akustik in Konzertsälen (mit gepolsterten Sitzen) sollte die EDT_{mid} schließlich in einem Bereich von 2,2 Sekunden liegen. Für „reine“ Opernhäuser kann dieser Wert in Äquivalenz zur Nachhallzeit um 0,5 Sekunden herabgesetzt werden. Ist eine hohe Präsenz der SängerInnen im Zuschauerraum erwünscht (= gute Sprachverständlichkeit), muss der Unterschied zwischen RT und EDT möglichst klein gehalten werden. Wird im Gegensatz dazu mehr Wert auf die Verschmelzung der einzelnen Töne und Schallquellen zu einem Gesamtklang gelegt, so soll die EDT im Vergleich zur RT deutlich größer sein. [BER]

Hallradius

Unter dem Hallradius versteht man akustisch gesehen - in einem geschlossenen Raum - diejenige Entfernung zur Schallquelle, an der die direkte und die reflektierte Schallintensität gleich groß sind. Da nur sehr wenige Schallquellen in alle Richtungen gleichmäßig Energie abstrahlen können (vgl. Kugelstrahler), wird bei der Richtentfernung r_R auch der Bündelungsgrad¹² von Schallquellen in die Berechnung des Hallradius mit einbezogen. [RAK S.68]

$$r_H = 0.057 \cdot \left[\sqrt{\frac{s}{m}} \right] \cdot \sqrt{\frac{V}{RT}} \quad (2.3)$$

V....Raumvolumen; RT....Nachhallzeit

$$r_R = \sqrt{\gamma} \cdot r_H = r_H = 0.057 \cdot \left[\sqrt{\frac{s}{m}} \right] \cdot \sqrt{\gamma \cdot \frac{V}{RT}} \quad (2.4)$$

γBündelungsgrad

¹² Der Bündelungsgrad beschreibt die Fähigkeit einer Quelle, den Schall gebündelt abstrahlen zu können. Er ist frequenzabhängig und steigt üblicherweise zu hohen Frequenzen hin an. Für Kugelstrahler gilt: $\gamma = 1$ [EA]

Hallpegel

Hopkins und Stryker [HOP] haben gezeigt, dass wenn der Direktschallpegel und der Nachhallpegel über die Entfernung zur Schallquelle aufgetragen werden, sich diese beiden Geraden genau beim Hallradius schneiden und dort dieselben Pegelwerte besitzen (siehe Abb. 2.17).

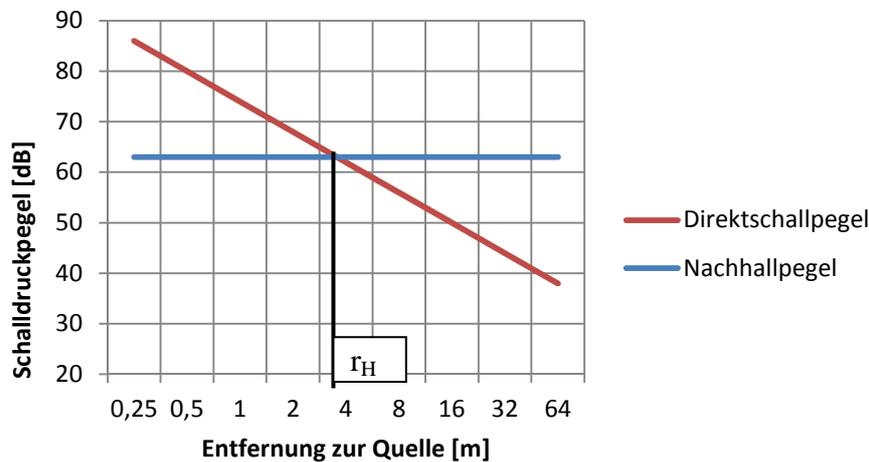


Abb. 2.17: Bsp. für den Nachhall- und Direktschallpegel eines Raumes

Wird nun das Entfernungsverhältnis zwischen dem Quelle-Hörer-Abstand (r_{QH}) und der Richtentfernung (r_R) definiert (r_{QH}/r_R) und bringt man dieses Verhältnis in Bezug zu den beiden in Abb. 2.17 gezeigten Schallpegeln, so lässt sich folgende Gleichung aufstellen [RAK S.108]:

$$L_H - L_D = 20 \cdot \log \frac{r_{QH}}{r_R} \quad (2.5)$$

L_HNachhallpegel

L_DDirektschallpegel

Bei Verwendung einer Kugelschallquelle ($\gamma = 1$) ist die Schallpegeldifferenz ($L_H - L_D$) beim Hallradius genau 0dB [RAK S.108].

Sind der maximale Direktschallpegel der Quelle, die Richtentfernung und der Quelle-Hörer-Abstand bekannt, so kann der Nachhallpegel aus Gleichung (2.5) bestimmt werden.

Klarheitsmaß (C_{80})

Während bei Sprache das Deutlichkeitsmaß darüber Auskunft gibt, ob die Signale noch mit ausreichender Durchsichtigkeit bis zum Hörerplatz übertragen werden, so wird bei Musik das Klarheitsmaß für diese Beurteilung herangezogen. Der einzige Unterschied zum Deutlichkeitsmaß besteht darin, dass für Musik andere Integrationsgrenzen gewählt wurden (80ms beim Klarheitsmaß; 50ms beim Deutlichkeitsmaß). [RAK, S.118]

$$C_{80} = 10 \cdot \log \frac{W_{0...80}}{W_{80...∞}} \quad [dB] \quad (2.6)$$

Mit dem Klarheitsmaß werden die Unterscheidbarkeit der verschiedenen Instrumente und die Erkennbarkeit zeitlich aufeinander folgender Töne beschrieben. Eine zu hohe Durchsichtigkeit bei Musik ist suboptimal, da für ein ausgewogenes Klangbild die frühen und die späten Reflexionen zu gleichen Anteilen vorhanden sein sollten. [RAK S.118,119]

Für das Klarheitsmaß gilt des Weiteren:

- Es hängt stark von der Art und Spielweise der Musik ab. Im Gegensatz zu legato gespielten Abschnitten verlangen kurz phrasierte Teile/Stücke nach höheren C_{80} Werten. [BER S.30,34]
- Es ist nicht statistisch unabhängig was bedeutet, dass C_{80} mit der Nachhallzeit und der Anfangsnachhallzeit korreliert (eine geringere Nachhallzeit führt zu einem höheren C_{80} = inverser Zusammenhang). Diese Tatsache schwächt die Aussagekraft des Klarheitsmaßes als eigenständiges akustisches Qualitätsmerkmal in geringem Maße ab. [BER S. 480,482,509]
- Frühe Reflexionen von den Seitenwänden und der Decke führen zu einer Erhöhung von C_{80} .
- Das Klarheitsmaß hat den Vorteil, dass es von erfahrenen Hörern qualitativ beurteilt werden kann (z.B. die Musik ist zu klar, die Hallenergie ist zu stark, die Balance zwischen Nachhall und Früher Energie ist nicht optimal). [BER S. 480]

Als Richtlinie für Konzerthäuser sollte das C_{80mid} ¹³ im Bereich von 0 bis -4dB liegen, um die Klangdurchmischung im Saal optimal ausnutzen zu können und der Zuhörer das Gefühl bekommt, als würde ihn die Musik umhüllen. Werte größer +1dB sind für sinfonische Musik ungünstig und sollten vermieden werden. [BER S.554][RAK S. 118]

Bei Opern hingegen sind positive C_{80} Werte erwünscht, da dadurch eine hohe Durchsichtigkeit von Musik erreicht wird und sich dazu parallel auch die Sprachverständlichkeit der SängerInnen verbessern wird. Eine Besonderheit beim Klarheitsmaß ist die Tatsache, dass sich für Proben- und Konzertsituation verschiedene Wertevorgaben als ideal herausgestellt haben. Bei Proben möchten die Dirigenten alle Details

¹³ Gemittelttes C_{80} über 500,1000 und 2000Hz; unbesetzter Zustand

der Musik erfassen und deswegen bewerteten sie somit C_{80mid} -Werte von +1 bis +5dB als am besten. Als Zuhörer hingegen empfanden dieselben Personen Werte von -1 bis -4dB als am passendsten. [BER S.478]

Schalldruckpegelverteilung/Schalldruckpegelabnahme

Ein weiteres raumakustisches Qualitätsmerkmal ist die gleichmäßige Übertragung von Bühnenschall zu den Zuhörern. Durch schalllenkende Maßnahmen wird gezielt versucht den sowohl natürlichen Abfall des Schalldruckpegels (der Schalldruck nimmt mit zunehmender Entfernung zur Schallquelle mit $1/r$ ab), als auch die raumakustisch bedingte Schalldruckpegelminderung (durch Absorption) auszugleichen. Ein Maß für den an einem Zuhörerort gemessenen Abfall bezogen auf einen Bezugsmessplatz ist die Schalldruckpegelabnahme ΔL . [WEI S. 201]

$$\Delta L = 10 \log \frac{E_{\infty}}{E_{\infty,0}} \quad [dB] \quad (2.7)$$

E_{∞} Schallenergie am Zuhörerort

$E_{\infty,0}$ Schallenergie am Bezugsmessplatz

Betrachtet man als Bezugsmessplatz die erste Reihe, dann sollte am hintersten Sitzplatz die Schalldruckpegelabnahme höchstens -5 dB betragen. [WEI S.201]

Werden zu viele oder zu wenige den Schall lenkende Mittel verbaut, oder werden vorher nicht bedachte Flächen und Objekte plötzlich zu fokussierenden Teilen, so kann dies zu Inhomogenität in der Schalldruckpegelverteilung führen. Des Weiteren gilt: Sind die absoluten Werte der Pegelunterschiede sehr gering (unter ca. 2dB), so kann davon ausgegangen werden, dass man sich im Diffusschallfeld befindet und dass die Schallpegelverteilung in diesem Bereich sehr homogen ist.

Stärkemaß (G)

Das Stärkemaß G dient zur Beurteilung der Lautstärke bzw. der Lautheit an einem vordefinierten Empfangsort. Ist die abgestrahlte Leistung der Schallquelle bekannt, so kann bei stationärem Zustand die Energiedichte an diesem Ort bestimmt werden [RAK S.122].

$$G = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(x) dt}{\int_0^{\Delta t} p^2 dt \cdot 4\pi r_s^2 \cdot \left[\frac{1}{m^2}\right]} \quad [\text{dB}] \quad (2.8)$$

r_s, \dots Sender-Empfänger-Abstand; üblich sind 10 m

Mit zunehmender Nachhallzeit steigt auch das Stärkemaß an, da die Energiedichte im Raum – durch zusätzliche Reflexionen – erhöht wird. Entstehen zu große Stärkemaß-Werte, führen diese zu einem Verlust an Sprachverständlichkeit und Klarheit [RAK S.122].

In der Raumakustik wird das Stärkemaß häufig für folgende Aufgaben verwendet:

- Zur Bewertung der akustischen Belastungen im Orchestergraben (An welchen Plätzen ist die Lautstärke auf Grund des negativen Einflusses des Grabens zu hoch bzw. wo gehören Verbesserungsmaßnahmen durchgeführt).
- Bei der Planung von Konzerthäusern kann aus den beiden Designgrößen RT_{mid} und G_{mid} ¹⁴ die optimale Sitzplatzanzahl und das benötigte Raumvolumen bestimmt werden. [BER S.446]
- Zur Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Sendeorte in Bezug zum Empfangsort (Wie ändert sich die Lautheit am Empfangsort, wenn die Quelle z.B. in ihrer Position verändert wird).

Wie aus der Literatur [BER S.430] bekannt, ist in Konzerthallen ein voller starker Bass erwünscht. Eine Beziehung zur Bewertung des Bassanteiles eines Raumes ist die Differenz zwischen den Stärkemaßen G_{low} ¹⁵ und G_{mid} . Positive dB-Werte beim Ergebnis ($G_{\text{low}} - G_{\text{mid}}$) weisen auf eine ausreichende Bassstärke im Raumklang hin.

Als optimales Stärkemaß bei Konzerthallen haben sich G_{mid} -Werte von 4 bis 5,5dB herausgestellt [BER S.446]. Für Opernhäuser sind auf Grund der niedrigeren Nachhallzeiten die idealen Werte im Schnitt um ca. 1,5dB geringer [BER S.534]. Fasold [SUR] befindet, sowohl für Sprache als auch für Musik, Stärkemaße von +1dB bis +10dB als passend.

Seitenschallgrad (LF)

Der Parameter „Seitenschallgrad (LF)“ beschreibt die Räumlichkeit eines Saales. Frühe von den Seitenwänden kommende Reflexionen unterstützen den akustischen Raumeindruck besonders stark, wenn sie – zeitlich gesehen – noch vor den Deckenreflexionen beim Zuhörer

¹⁴ Gemittelttes G über 500 und 1000Hz; unbesetzter Zustand

¹⁵ Gemittelttes G über 125 und 250Hz; unbesetzter Zustand

eintreffen. Zur Messung der seitlichen Schallanteile wird in der Praxis ein Mikrofon mit der Richtcharakteristik¹⁶ „Acht“ verwendet [RAK S.120].

$$LF = \frac{(W_{5...80})_{\text{seitl.}}}{W_{0...80}} \quad (2.9)$$

Im Allgemeinen gilt: Je mehr frühe seitliche Reflexionen vorhanden sind, desto weiter kann sich die empfundene Schallquellenbreite (ASW¹⁷) vergrößern und es wird eine stärker empfundene Räumlichkeit erzeugt [BER S.28]. Bei geometrisch kritischen Zuhörerzonen, wo zu wenige frühe Seitenreflexionen eintreffen, kann durch zusätzliche schalllenkende Maßnahmen trotzdem noch ein guter akustischer Raumeindruck erreicht werden. Auch die elektroakustische Zuspiegelung dieser fehlenden Reflexionen ist möglich.

Während Beranek [BER S.470] in seinen Studien Seitenschallgrade von 15% bis 20% als gut und LF-Werte von größer 20% als hervorragend bewertet, ist laut Fasold [SUR] ein Seitenschallgrad zwischen 25% und 40% für Konzertsäle wünschenswert. Für beide Vorgaben gilt jedoch: je höher der LF, desto besser ist der Raumeindruck.

Echo-Kriterium (EK)

Mit dem Echo-Kriterium nach Dietsch und Kraak (1986) können – anhand der Reflektogramme¹⁸ – in einem Raum auftretende Echos aufgespürt und in ihrer Stärke bewertet werden. Durch die Anwendung einer Gewichtsfunktion auf die Energie-Zeitkurve ergibt sich folgender Differenzquotient [AO2 S.255; WEI S.198]:

$$EK(\tau) = \frac{\Delta t_s(\tau)}{\Delta \tau} \quad (2.10)$$

t_s.....Schwerpunktszeit¹⁹

Δτ.....signalabhängige Zeitangabe; bei Sprache Δτ = 9ms; bei Musik Δτ = 14ms

¹⁶ Beschreibt die Empfindlichkeit eines Mikrofons in Abhängigkeit vom Schalleinfallswinkel. Sie wird häufig nach ihrem Aussehen im Polardiagramm beschrieben z.B. Acht, Niere, Superniere, Keule, Kugel, etc. [GOE]

¹⁷ ASW.....engl.: Apparent Source Width

¹⁸ Andere Bezeichnung für Raumimpulsantwort.

¹⁹ Ist definiert als das Moment der quadrierten Raumimpulsantwort und wird ebenso als ein Maß für den Raumeindruck und die Durchsichtigkeit von Musik- und Sprachdarbietungen angesehen. [WEI S.197]

Da das Echo-Kriterium zusätzlich vom Tempo und der Akzentuierung der Signalform abhängig ist (höheres Tempo und kurz phrasiert = niedrigeres EK), haben sich bei Versuchen jeweils zwei Grenzwerte für die Hörbarkeit von Echos – 2 für Sprache und 2 für Musik – herauskristallisiert. Bei Sprache ist die obere Grenze mit einem EK-Wert von 0,9 und 1,0 definiert, während bei Musik die Werte von 1,5 und 1,8 nicht überschritten werden sollten. Mehrmaliges Übertreten der Echogrenze mit einer Periodizität von mindestens 50ms bei Sprache und 80 bis 100ms bei Musik lassen auf ein im Raum hörbares Flatterecho schließen. [WEI S.198]

3 Raumakustische Analyse der Oper

Nachdem die für diese Arbeit notwendigen Grundlagen in Kapitel 2 erläutert wurden, kann nun der erste Arbeitsteil dieser Diplomarbeit vorgestellt werden, welcher aus der raumakustischen Vermessung und einer ersten Analyse der Grazer Oper besteht (Weiterführende raumakustische Analyse siehe Kapitel 4). Neben der Erklärung zum gesamten Messablauf werden die Parameter Nachhallzeit, Anfangsnachhallzeit und Klarheitsmaß ausgewertet und mit anderen Häusern verglichen. Am Ende findet sich eine Beschreibung der empirisch bekannten akustischen Probleme der Grazer Oper wieder.

3.1 Raumakustische Vermessung

Um die raumakustische Analyse der Grazer Oper durchführen zu können bedarf es einer Messapparatur mit der man in der Lage ist, einen derart großen Raum mit ausreichend Schallenergie anzuregen. Es stand das Messsystem „01dB-Symphonie“, welches die Möglichkeit der Raumanalyse mittels der MLS-Korrelationsmesstechnik bietet, zur Verfügung.

3.1.1 Maximum Length Sequence (MLS)

Bei der MLS-Methode wird die Impulsantwort eines Systems dadurch bestimmt, indem mit einem reproduzierbaren, energiereichen Signal (MLS Signal) das lineare System angeregt, die Systemantwort gemessen und diese mit dem bekannten Erregersignal gekreuzkorreliert wird. Auf die daraus entstandene periodische Impulsantwort (PIR) des Systems wird anschließend die Diskrete Fourier Transformation angewendet und man erhält die komplexe, diskrete Übertragungsfunktion, woraus sich alle weiteren Parameter berechnen lassen. [RAK]

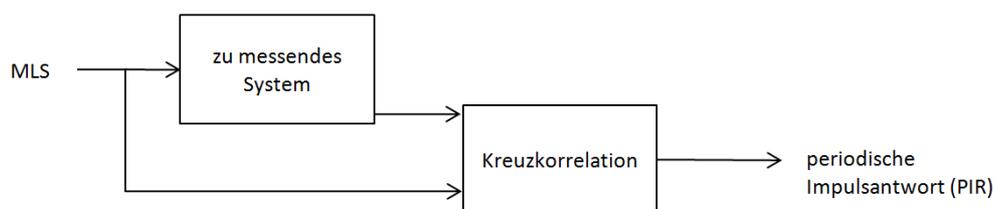


Abb. 3.1: Blockschaltbild der Funktionsweise einer MLS-Messung [RAK]

Die Dauer eines MLS-Signals ist bei einer Messung sehr wichtig, da diese mindestens so lang sein muss, wie die geschätzte Nachhallzeit.

Am **Beispiel** der Grazer Oper berechnet sich die benötigte MLS-Länge wie folgt:

Die geschätzte Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen ($f < 500\text{Hz}$) sei $RT_{gesch.} = 2,5 \text{ sec}$. Die MLS mit der Ordnung $m = 17$ hat $L = 131071$ logische Zustände. Mit der Taktfrequenz von 44100Hz erhält man so eine Wiedergabedauer der MLS von

$$T_{MLS} = L \cdot \Delta t = \frac{L}{f_c} = \frac{2^{17}-1}{44100} = 2,97 \text{ sec.} \quad (3.1)$$

Vorteile der MLS Methode

Bei der MLS-Korrelationsmethode muss nicht das Erregersignal selbst einem idealen Impuls gleichen sondern es reicht, wenn die Autokorrelationsfunktion des Erregersignals diese Bedingung erfüllt. [RAK]

Der Effektivwert eines MLS-Signals ist immer gleich 1 und somit unabhängig von der aktuellen Periode des Signals. Dies bedeutet, dass der Effektivwert gleich dem Maximalwert des MLS-Signals ist. Der „crest factor“ wird also 1, was einem Minimum entspricht. [RAK]

Im Vergleich mit anderen Messmethoden ist das MLS-Erregersignal das energiereichste. Dadurch ergeben sich eine Verbesserung des Signal-Störabstandes (SNR) und ein deutlicher virtueller Dynamikgewinn für die Messung. [RAK]

Durch die Tatsache, dass transiente Störsignale nicht mit dem pseudozufälligen MLS-Signal korrelieren, ist die MLS-Methode weniger anfällig gegenüber allen natürlichen Störgeräuschen. [RAK]

3.1.2 Messaufbau

Für die raumakustischen Messungen wurde die gültig geeichte Schallpegelmessanlage „01dB-Symphonie“ mit der dazugehörigen Messsoftware „dBTRIG V4.7“ und „dBATI“ verwendet. Dieses System ist ein in Echtzeit arbeitendes 2 Kanal Schall- und Vibrationsmesssystem, wobei die auf dem Computer installierte Software als Steuer- und Analysetool diente.

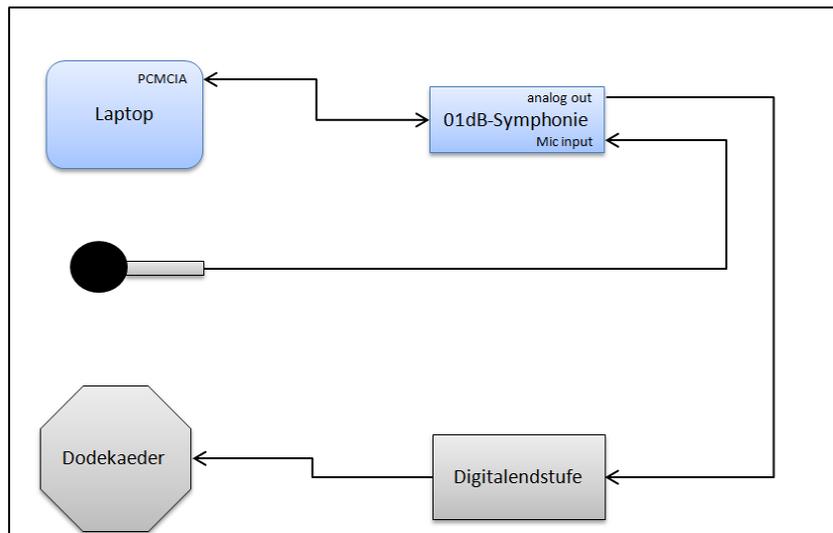


Abb. 3.2: Blockschaltbild des in der Oper verwendeten Messaufbaus

Abbildung Abb. 3.2 zeigt das Blockschaltbild des Messaufbaus. Die Verbindung des Laptops mit der 01dB-Symphonie Hardware wurde über die PCMCIA Schnittstelle hergestellt. Der analoge Ausgang der externen Einheit war mit einer digitalen Endstufe des Typus TOA DA550F verkabelt, wobei es sich hierbei um einen digitalen 4-fach Verstärker mit 4x 550W an 4 Ohm handelt. Im Betrieb am 01dB Metravib D08 Dodekaeder, einer Kugelschallquelle mit insgesamt 9 Lautsprechern, wurden die Kanäle gebrückt und die Endstufe lieferte somit 1.100W an 8 Ohm. Die Aufnahme der Messergebnisse erfolgte über das dazugehörige ¼ Zoll Messmikrofon.

3.1.3 Messmikrofonanordnung und Quellenpositionen

Um eine flächendeckende Analyse des Raumes durchführen zu können, wurde insgesamt an 39 Zielpositionen gemessen. Die Quelle musste auf Grund von Umbauarbeiten an 2 unterschiedlichen Orten platziert werden. Bei der Vermessung des Parketts stand der Dodekaeder im Orchestergraben, während bei der Messung am Balkon und in der Galerie die Quelle auf dem auf Bühnenhöhe hochgefahrenem Orchestergraben positioniert war.

Für die korrekte Aufstellung der Messmikrofone sollten folgende Punkte beachtet werden [RAK]:

- Mikrofonstellungen müssen mindestens $\lambda/2$ voneinander entfernt sein. Betrachtet man den üblichen Messbereich von ca. 80Hz bis 16kHz so entspricht dies einem Abstand von mindestens 2m.
- Der Abstand der Mikrofone zur nächsten reflektierenden Oberfläche muss mindestens $\lambda/4$ betragen. Für den bereits oben genannten Messbereich ergibt sich somit 1m Minimalabstand.

- Die Höhe der Mikrofonstellungen sollte mindestens 1,2m betragen. Dies entspricht der durchschnittlichen Ohrenhöhe von sitzenden Zuhörern.
- Um einen zu starken Direktschalleinfluss zwischen Messmikrofon und Schallquelle zu vermeiden, sollte der Minimalabstand d_{min} nicht unterschritten werden. Zur Berechnung dieses Wertes dient die folgende Formel:

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot RT_{gesch}}} \quad (3.2)$$

cSchallgeschwindigkeit

VRaumvolumen

RT_{gesch}geschätzte Nachhallzeit

Für die Messungen in der Grazer Oper ergibt sich mit einer Schallgeschwindigkeit von 343m/s (bei 20°C), einem Raumvolumen von 7730m³ und einer geschätzten Nachhallzeit von 2,5s ein d_{min} von:

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{7730}{343 \cdot 2,5}} = 6m$$

Unter Berücksichtigung der oben angeführten Punkte und mit der Absicht einen möglichst großen Bereich analysieren zu können, wurden folgende Messpositionen ausgewählt:

Mikrofonstellungen und Quelleposition

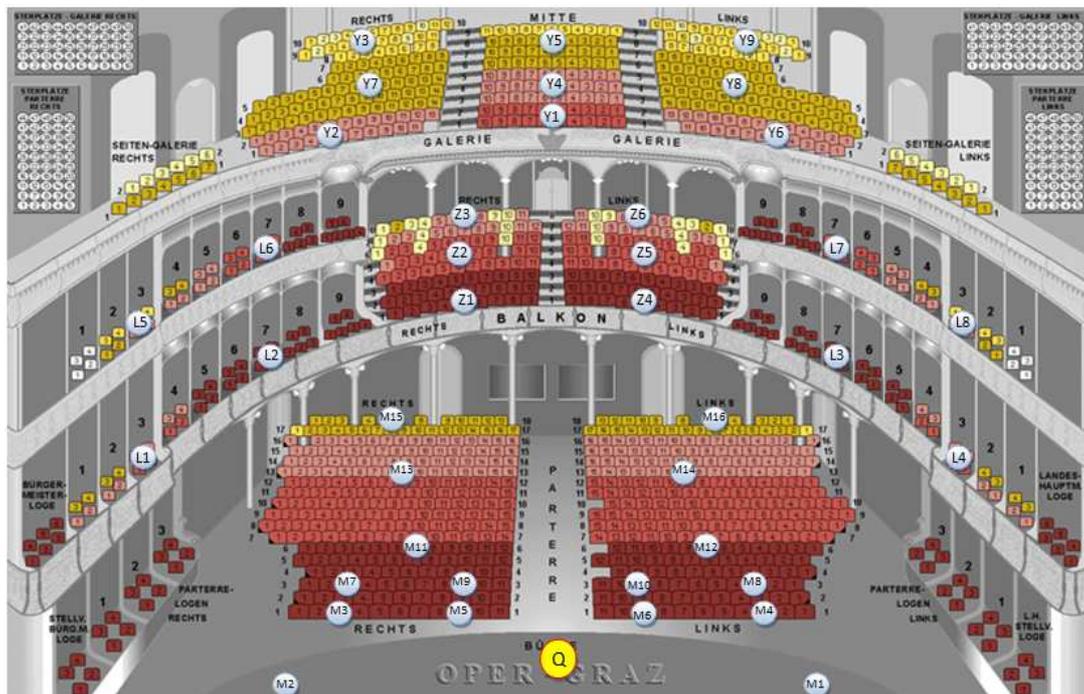


Abb. 3.3: Sitzplan der Oper [OGS] mit eingezeichneten Mikrofon (M,Y,Z)- und Quellepositionen (Q)

Tab. 3.1: Mikrofonstellungen mit Sitzplatzangabe

Messposition	Rang	Reihe	Sitz
M1	Graben li	-	-
M2	Graben re	-	-
M3	Parkett re	1	3
M4	Parkett li	1	3
M5	Parkett re	1	9
M6	Parkett li	1	9
M7	Parkett re	3	3
M8	Parkett li	3	3
M9	Parkett re	3	9
M10	Parkett li	3	9
M11	Parkett re	6	7
M12	Parkett li	6	7
M13	Parkett re	13	9
M14	Parkett li	13	9
M15	Parkett re	18	neben 4
M16	Parkett li	18	neben 4
Z1	Balkon re	1	5
Z2	Balkon re	5	6
Z3	Balkon re	7	7
Z4	Balkon li	1	5
Z5	Balkon li	5	6
Z6	Balkon li	7	7
Y1	Galerie mi	1	5/6
Y2	Galerie re	1	5
Y3	Galerie re	9	5
Y4	Galerie mi	4	5/6
Y5	Galerie mi	8	5/6
Y6	Galerie li	1	5
Y7	Galerie re	5	9
Y8	Galerie li	5	9
Y9	Galerie li	9	5

Tab. 3.2: Quellepositionen

Quelleposition	Abstand von der Bühnenvorderkante	Abstand von der Mitte Gang Parkett	Höhe
Q1 Graben	3m	0m	im Graben auf 1,3m
Q2 Bühne	3m	0m	Auf Bühnenhöhe auf 1,3m

3.1.4 Ablauf der Messung

Wie bereits am Beginn dieses Kapitels beschrieben, wurde für die Messungen in der Oper die MLS-Korrelationsmethode verwendet. Dabei musste zuerst das von der Software erzeugte MLS-Signal mittels der digitalen Leistungsendstufe verstärkt werden, um anschließend damit die Lautsprecher der Kugelschallquelle antreiben zu können. Die durch die Anregung des Raumes entstandene Raumantwort wurde mit dem Messmikrofon an der jeweiligen Stelle aufgenommen und gespeichert. Nach der automatischen Bearbeitung durch die Software dBATI konnten die Ergebnisse an den spezifischen Messpositionen dargestellt werden.

Messprotokoll M1-M16

Datum:	15.02.2010
Ort:	Grazer Oper
Messzeit:	10:14 bis 10:42
Temperatur:	20°C
Luftfeuchte:	25%
Besonderheiten:	keine

Messprotokoll Z1-Z6;Y1-Y9

Datum:	26.10.2010
Ort:	Grazer Oper
Messzeit:	10:45 bis 12:57
Temperatur:	22°C
Luftfeuchte:	22%
Besonderheiten:	keine

3.2 Auswertung der Messergebnisse

Im ersten Teil der raumakustischen Analyse werden die aus den Messungen gewonnenen Kriterien Nachhallzeit, Anfangsnachhallzeit und Klarheitsmaß untersucht und ausgewertet. Nicht dargestellte bzw. ergänzende Messergebnisse bzw. Messvergleiche befinden sich im Anhang.

3.2.1 Nachhallzeit (RT)

Die Nachhallzeit ist eines der wichtigsten raumakustischen Charakteristika und gibt darüber Aufschluss, ob der jeweilige Raum für die darin aufzuführende Musik generell geeignet ist. Die Analyse der RT-Homogenität und die Beurteilung des saaleigenen Klangcharakters sind zwei weitere Kriterien, die aus der Nachhallzeit eines Raumes abgeleitet werden können.

Nachhallzeit und Verwendungszweck

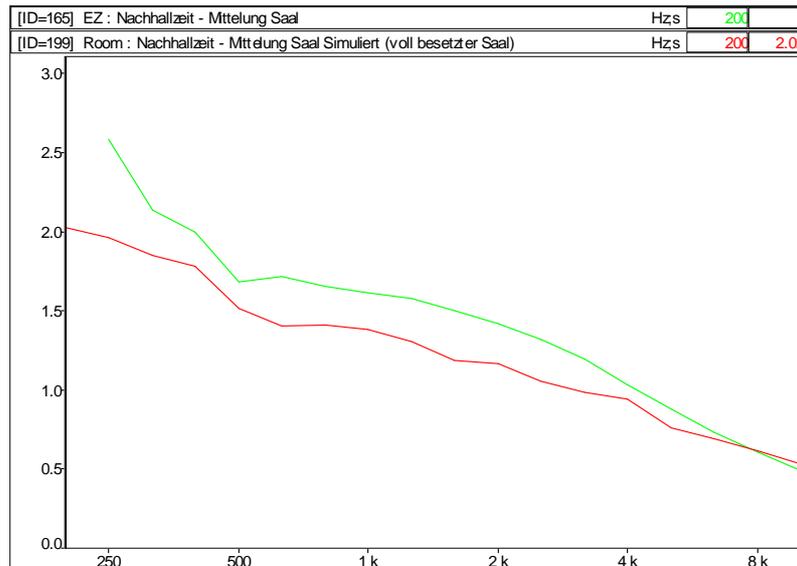


Abb. 3.4: Frequenzabhängige Nachhallzeit (grün...leerer Saal; rot...voll besetzter Saal simuliert)

Zusammenfassung der Messergebnisse und allgemeine Anmerkungen:

Da es durch die Größe des Raumes schwierig war, diesen mit ausreichend tieffrequenter Schallenergie ($< 250\text{Hz}$) anzuregen um reproduzierbare Messergebnisse in diesem Bereich zu erhalten, wurde für die Auswertung der frequenzabhängigen Nachhallzeiten eine Bandbreite von 250Hz bis 16000Hz gewählt. In Anlehnung an die Literatur [BER][SUR], wo die optimalen Werte für die mittlere Nachhallzeit meistens im besetzten Zustand angegeben werden, wurde in Abb. 3.4 die aus der Simulation (siehe Kap. 4) stammende Nachhallkurve für einen voll besetzten Saal eingefügt. Man erkennt deutlich, dass durch die Absorption des Publikums die Nachhallzeit über den gesamten Frequenzbereich sinkt. Mit einer **RT_{mid} von 1,4s in besetztem Zustand** (genaue Nachhallzeittabelle siehe Anhang) und mit dem Volumen von 7730m^3 eignet sich die Grazer Oper nach Abb. 2.15 besonders gut für Sprachwiedergaben und Mehrzwecknutzungen. Die eher trockene Akustik ist gemäß Tab. 2.2 ideal für Operndarbietungen, während für die Aufführung von konzertanten- bzw. sinfonischen Stücken die optimale mittlere Nachhallzeit um $0,5\text{s}$ zu gering ist.

Einen Sonderfall bildet dabei jene Situation, bei der ein Saal als „reiner“ Aufnahmeort dienen soll. Hierbei sind während des Aufnahmeprozesses meistens keine Zuhörer im Saal, wodurch der schallabsorbierende Effekt durch Personen wegfällt. Für dieses Szenario würde sich die

Grazer Oper auch als Aufnahmeort für barocke- bzw. klassische Orchestermusik bedingt eignen.

Örtliche Unterschiede in der Nachhallzeit (Homogenität)

Von einer „homogenen Nachhallverteilung“ spricht man, wenn die örtlichen Unterschiede in der Nachhallzeit möglichst gering ausfallen. Eine negative Beeinflussung der Homogenität wird durch das Auftreten von Raummoden (siehe auch Kapitel 2.1: *Stehende Wellen*) verursacht, da diese zu einer Verkürzung bzw. Verlängerung der frequenzabhängigen Nachhallzeit führen können. Große Unterschiede in der örtlichen Nachhallzeit weisen normalerweise darauf hin, dass das Schallfeld nicht diffus genug verteilt ist. Bei den hier durchgeführten Analysen wird die Homogenität durch den punktuellen Vergleich von Hörpositionen einer Zuhörerebene untersucht und ausgewertet.

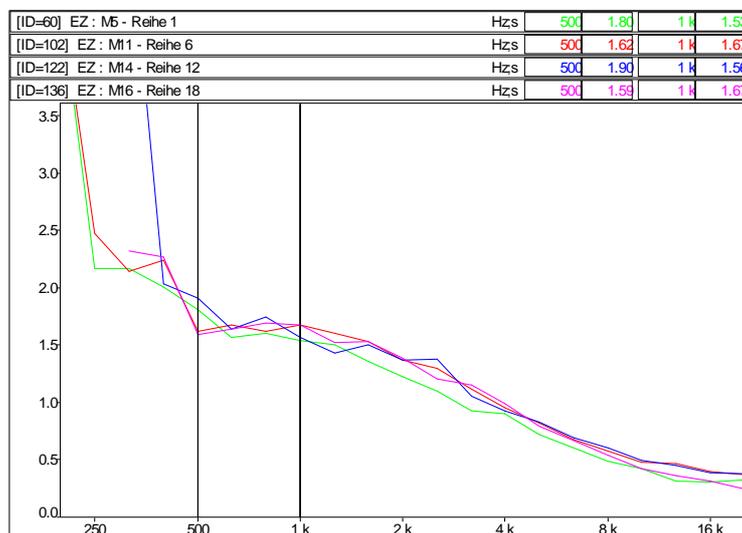


Abb. 3.5: Örtliche Unterschiede in der Nachhallzeit – Parkett

In Abb. 3.5 ist zu erkennen, dass im Parkett bei tieferen Frequenzen ($< 4000\text{Hz}$) die Abweichungen der einzelnen Messpositionen tendenziell größer werden, da die Geometrie des Raumes das Messergebnis mit beeinflusst. Im 500Hz-Band beträgt der maximale Unterschied zwischen den untersuchten Messpunkten 0,31 Sekunden. Bei 1000Hz fällt dieser Wert mit 0,14s deutlich geringer aus. In der Gesamtheit betrachtet, zeigt sich für das Parkett eine gleichmäßige Verteilung des Nachhalls mit größeren Abweichungen in den tiefen Frequenzbändern ($< 500\text{Hz}$).

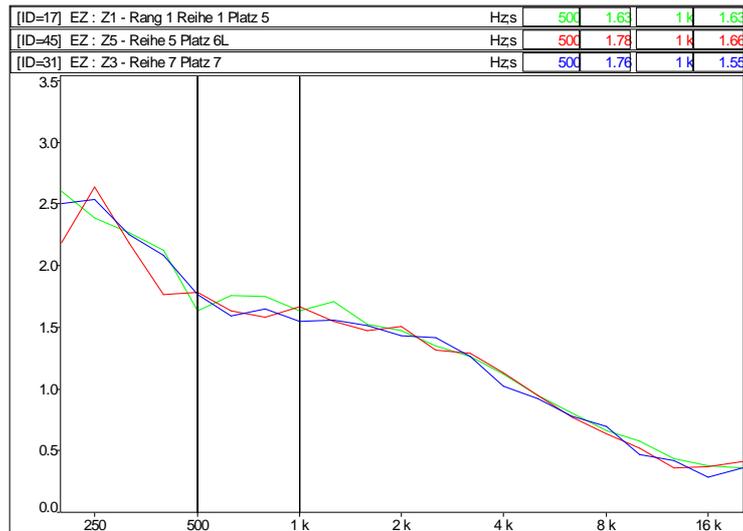


Abb. 3.6: Örtliche Unterschiede in der Nachhallzeit - Balkon

Im Vergleich mit dem Parkett (Abb. 3.5), lässt sich am Balkon (Abb. 3.6) eine deutlich homogenere Nachhallzeitverteilung über den ganzen Zuhörerbereich feststellen. Der maximale Unterschied bei 500Hz beträgt hier nur 0,15 Sekunden. Bei 1000Hz zeigt sich zwischen den Messpunkten Z3 und Z5 eine Differenz von 0,11s. Als Fazit kann festgehalten werden, dass sich am Balkon ein sehr ausgewogenes, homogenes Klangfeld einstellen wird.

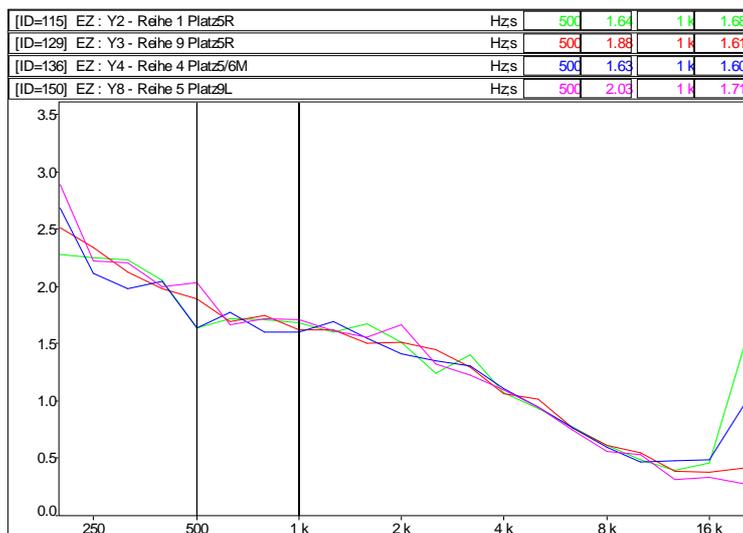


Abb. 3.7: Örtliche Unterschiede in der Nachhallzeit - Galerie

Im obersten Zuhörerbereich der Grazer Oper, der Galerie (Abb. 3.7), zeigen sich im Vergleich zu Parkett und Balkon die größten Unterschiede in den einzelnen Messpositionen. Die errechneten 0,39s Differenz zwischen MP Y2 und Y8 bei 500Hz lassen auf eine leichte Störung des Schallfeldes in diesem Frequenzband schließen. Auffällig sind außerdem die Sprünge in der Nachhallzeit zwischen 1500Hz und 4000Hz, die ebenso, wie die bereits genannten Störungen, auf ein leicht ungleichmäßiges Reflexionsverhalten im Decken- und Seitenwandbereich der Galerie zurückzuführen sind.

Nachhallzeit und Klangeigenschaften

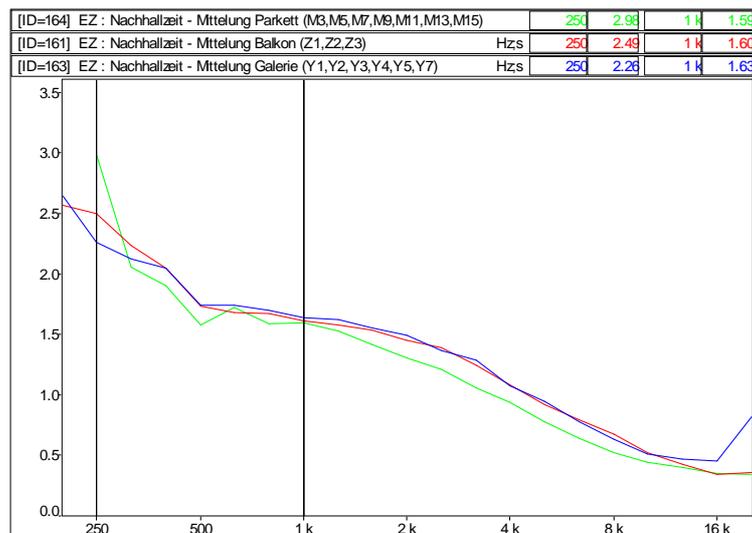


Abb. 3.8: Frequenzabhängige Nachhallzeit der 3 Zuhörerebenen

Für die Bewertung der Klangeigenschaften in der Grazer Oper werden die im leeren Saal gemessenen Nachhallzeitkurven herangezogen. Die in Abb. 3.8 dargestellten, gemittelten Kurven für das Parkett, den Balkon und die Galerie zeigen einen nahezu identen Verlauf mit dem einen Makel, dass die Werte für das Parkett über den gesamten Frequenzbereich minimal geringer sind. Ein Grund für dieses Phänomen könnte mit der Position der Schallquelle bei der Erfassung der Messdaten im Parkett zusammenhängen, da sich hierbei die Quelle nicht auf Bühnenhöhe, sondern im Orchestergraben befand.

Wird die allgemeine Form der frequenzabhängigen Nachhallkurven betrachtet, so ist ein Anstieg der Nachhallzeiten hin zu tiefen Frequenzen ($\leq 500\text{Hz}$) erkennbar, wodurch der subjektive Höreindruck eines „warmen“ Klangbildes erzeugt wird. Werte für die Nachhallzeit von 2,3 bis 3 Sekunden, bei 250Hz, sind für einen derart großen Raum und dessen Verwendungszweck durchaus akzeptabel, werden sich aber mit dem Besetzungszustand minimal nach unten bewegen.

Der eher flach abfallende Bereich von 500Hz bis 3kHz führt zu einem in sich neutral und angenehm klingenden Mittenbild. Die über diesen Frequenzbereich gemittelte Nachhallzeit ist mit ca. 1,6 Sekunden als eher zu gering zu bewerten. Durch Besetzung mittels Publikum wird sich dieser Wert ebenso verkürzen, während in einschlägiger Literatur [BER] Vorgaben von 1,8 – 2 Sekunden (unbesetzter Zustand) und 1,4 Sekunden (besetzter Zustand), für Opernhäuser dieser Größe, als optimal angesehen werden.

Auch die Frequenzbänder oberhalb von 3kHz weisen tendenziell zu geringe Werte auf, wodurch der „Glanz“ in der Musik etwas verloren geht und ein leicht dunkles Klangbild entsteht.

3.2.2 Anfangsnachhallzeit (EDT)

Wie bereits in Kapitel 2.2 erklärt, eignet sich die Anfangsnachhallzeit – auf Grund ihrer Ortsabhängigkeit – nur bedingt für eine allgemeine raumakustische Qualitätsbeurteilung. Im Hinblick auf den Verwendungszweck des Saals kann sie jedoch trotzdem einige wichtige Erkenntnisse liefern. In Relation zur „normalen“ Nachhallzeit gesetzt, bietet die EDT ein wichtiges Werkzeug zur Klassifizierung von Sitzplatzbereichen.

Anfangsnachhallzeit und Verwendungszweck

Tab. 3.3: Anfangsnachhallzeit Grazer Oper

C:\...\T60_Ränge.CMG	
ID	170
Familie	EDT
Typ	
Auflösung der X-Achse	1/3
Datum	26.10.10 12:29:23
Kanalort	Anfangsnachhallzeit
Kommentare	Mittelung Saal
Kanal	1
Hz	s
200	---
250	8,60
315	---
400	2,32
500	2,09
630	1,98
800	1,63
1 k	1,73
1.25 k	1,56
1.6 k	1,54
2 k	1,49
2.5 k	1,33
3.15 k	1,26
4 k	1,07
5 k	0,93
6.3 k	0,84
8 k	0,74
10 k	0,66

Mit einer aus Tab. 3.3 errechneten EDT_{mid} von **1,86s** liegt die Grazer Oper sehr nahe an der Vorgabe von Beranek [BER], der für eine exzellente Akustik bei reinen Opernhäusern einen EDT_{mid} -Wert von 1,7 Sekunden vorschlägt. Für die Nutzung als Konzertsaal wären Werte um 2,2 Sekunden erforderlich, die nur durch eine Anhebung des gesamten Nachhalls erreicht werden könnten.

Klassifizierung von Sitzplatzbereichen

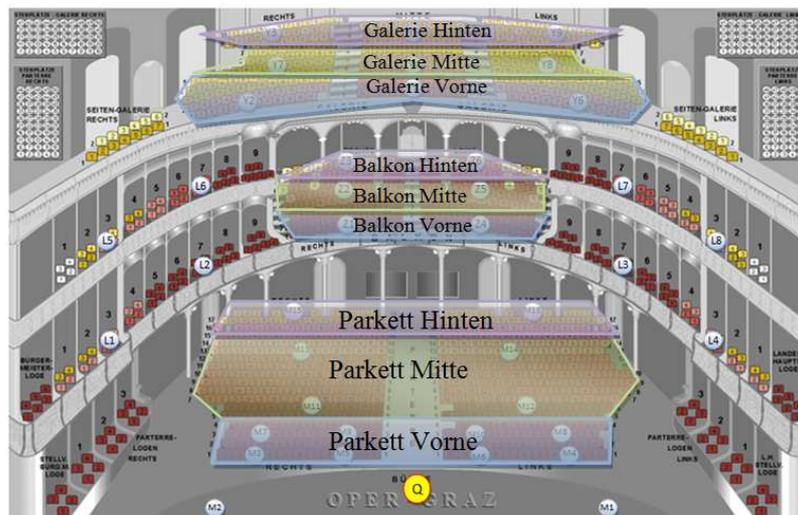


Abb. 3.9: Einteilung der Sitzplatzbereiche

Zur Vereinfachung bei der Klassifizierung von Sitzplätzen, erfolgte eine Einteilung der Zuhörerzonen in Sitzplatzbereiche gemäß Abb. 3.9, wobei folgende Messpunkte für die Analyse herangezogen wurden:

Tab. 3.4: Einteilung der Sitzplatzbereiche - Messpunkte

Sitzplatzbereich	Gemittelte Messpunkte
Parkett Vorne	M3,M4,M5,M6,M7,M8,M9,M10
Parkett Mitte	M11,M12,M13,M14
Parkett Hinten	M15,M16
Balkon Vorne	Z1,Z4
Balkon Mitte	Z2,Z5
Balkon Hinten	Z3,Z6
Galerie Vorne	Y1,Y2,Y6
Galerie Mitte	Y4,Y7,Y8
Galerie Hinten	Y3,Y5,Y9

Der Vergleich zwischen Nachhallzeit und Anfangsnachhallzeit in den einzelnen Sitzbereichen gibt Aufschluss über deren akustischer Qualität und kann mögliche Störungen des Schallfeldes durch unzureichenden bzw. zeitlich zu spät eintreffenden Nachhall aufzeigen. Je höher die EDT im Vergleich zur RT, desto besser ist der Hörerplatz. In Abb. 3.10 sind beispielhaft die beiden Kurven Nachhallzeit und Anfangsnachhallzeit für das Parkett Vorne grafisch dargestellt. Alle weiteren für die Analyse verwendeten Vergleiche befinden sich im Anhang.

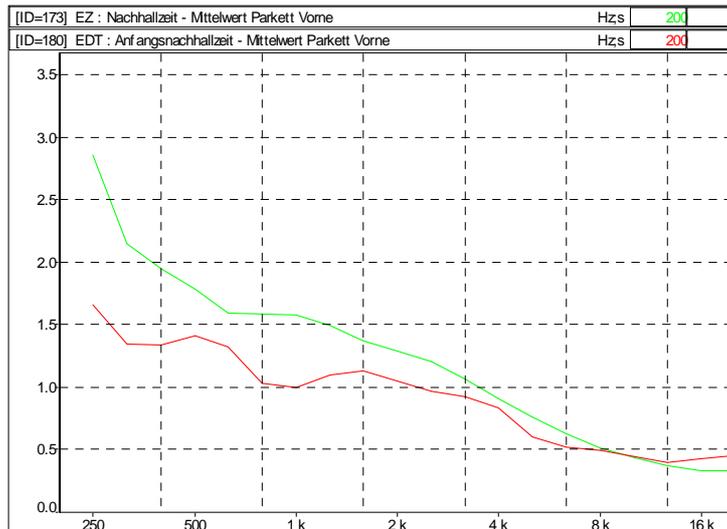


Abb. 3.10: Vergleich von Nachhallzeit und Anfangsnachhallzeit – Parkett Vorne

Die Analyse der einzelnen Kurven führte zu folgenden Ergebnissen:

Sitzplatzbereich	Klassifizierung und Klangbild
Parkett Vorne	<ul style="list-style-type: none"> • Die EDT liegt fast im gesamten Frequenzbereich deutlich unter der RT; ein möglicher Grund dafür könnte der Abschattungseffekt durch das vordere Bühnengeländer sein (die Quelle befand sich bei dieser Messung im Orchestergraben!) • Sehr trockener Klang • weniger gute Sitzplätze (mit Vorbehalt!)
Parkett Mitte	<ul style="list-style-type: none"> • Die EDT-Kurve liegt leicht über jener von der Nachhallzeit; eine deutliche Überhöhung bei 500Hz fällt auf; • Ausgewogenes, warmes Klangbild mit etwas mehr Höhenbrillanz • Allgemein guter Sitzbereich
Parkett Hinten	<ul style="list-style-type: none"> • Klar erkennbare Sprünge sowohl in der EDT- als auch RT-Kurve; mögliche Abschattung durch den Balkonüberhang; unter ca. 3kHz liegt die EDT über der RT • Mittenbetonter Klangcharakter mit weniger Höhenglanz • Weniger guter Sitzbereich
Balkon Vorne	<ul style="list-style-type: none"> • Die EDT-Werte liegen deutlich über den RT-Werten; leichte Sprünge bei der EDT • Sehr guter, warmer, musikalisch angenehmer Klang • Die besten Sitzplätze der Oper

Balkon Mitte	<ul style="list-style-type: none"> • Starke Unregelmäßigkeiten in der EDT-Kurve (ortsbezogene Raummoden) • Ausgewogenes, neutrales Klangbild • Mittelmäßig guter Sitzbereich
Balkon Hinten	<ul style="list-style-type: none"> • Die Anfangsnachhallzeiten sind beinahe in allen Frequenzbändern größer als die Nachhallzeiten; speziell im Bassbereich sehr hohe EDT-Werte • Bassstarker und brillanter Klangeindruck • Die zweitbesten Sitzplätze der Oper
Galerie Vorne	<ul style="list-style-type: none"> • Bis auf einen Ausreißer bei 630Hz verlaufen die beiden Kurven annähernd parallel • Warmer, ausbalancierter Klangcharakter • Allgemein guter Sitzplatzbereich
Galerie Mitte	<ul style="list-style-type: none"> • Über 1kHz gibt es kaum Unterschiede zwischen den EDT- und RT-Werten; darunter fallen die überhöhten Anfangsnachhallzeiten auf • Basslastiger Gesamteindruck im Vergleich zu den Mitten und Höhen • Allgemein guter Sitzplatzbereich
Galerie Hinten	<ul style="list-style-type: none"> • Große Sprünge in der EDT unterhalb von 2kHz; wie bereits im vorderen Teil und in der Mitte der Galerie, ist auch hier ein unnatürlich hoher Wert bei ca. 500Hz erkennbar → mögliche Ursache: Abschattung/Reflexionen durch die hinteren Galeriebögen; über 2kHz zeigt sich ein sehr gutes Verhältnis zwischen RT und EDT • Guter Höhenglanz im Kontext zu etwas undefinierten Basszeiten • Mittelmäßig guter Zuhörerbereich

3.2.3 Klarheitsmaß (C_{80})

Obwohl das Klarheitsmaß nicht als unabhängiges raumakustisches Qualitätsmerkmal herangezogen werden kann, so hat es dennoch eine wichtige Bedeutung bei der Beurteilung der Register- und Zeitdurchsichtigkeit bei Musikdarbietungen in Räumen (siehe Kapitel 2.2). Für die in dieser Arbeit durchgeführte Analyse wird das C_{80} für die Beurteilung von Musikdurchsichtigkeit und Sprachverständlichkeit beider maßen verwendet. Neben der generellen Eignung des Saals für die darin aufzuführende Musik, wird auch dessen Klangbild anhand von C_{80} analysiert.

Klarheitsmaß und Verwendungszweck**Tab. 3.5:** Klarheitsmaß C_{80} Saal

Frequenz in Hz	Klarheitsmaß C_{80} in dB
250	-2,57
315	-1,35
400	-0,30
500	-1,09
630	0,86
800	0,35
1000	0,58
1250	1,03
1600	1,29
2000	1,77
2500	2,38
3150	2,66
4000	3,48
5000	4,38
6300	5,56
8000	7,02
10000	9,24
12500	11,47
16000	11,47

Wie in Tab. 3.5 zu erkennen ist, liegt das Klarheitsmaß beinahe in allen Frequenzen deutlich im positiven Dezibel-Bereich, wodurch eine außerordentlich gute Erkennbarkeit der einzelnen Instrumente und Töne erreicht wird. Mit der damit ebenfalls erhöhten Sprachverständlichkeit bei SängerInnen, ist die Grazer Oper besonders gut als Aufführungsstätte für klassische Opern geeignet. Die für Konzerthäuser als optimal empfundenen C_{80mid} -Werte von 0 bis -4dB werden knapp nicht erreicht. Das aus Tab. 3.5 **errechnete mittlere Klarheitsmaß beträgt 0,68dB** und liegt somit minimal über der oberen Grenze. Beranek's Beobachtungen bezüglich verschiedener Wertevorgaben in Abhängigkeit der Spielsituation (Probe vs. Aufführung) lässt darauf schließen, dass die Grazer Oper bei Proben von den Dirigenten als akustisch sehr gut empfunden wird, da durch die relativ hohen Klarheitsmaßwerte alle Details der Musik gut wahrgenommen werden. Die für sinfonische Musik bzw. für größtenteils legato phrasierte Stücke geforderte Klangdurchmischung im Saal wird dann erreicht, wenn das Klarheitsmaß klar unter der 0dB-Grenze bleibt. Diese Vorgabe wird von der Oper nicht ganz erfüllt, wodurch Aufführungen der oben genannten Stücke akustisch weniger zufriedenstellende Ergebnisse liefern werden.

Klarheitsmaß und Klangbild

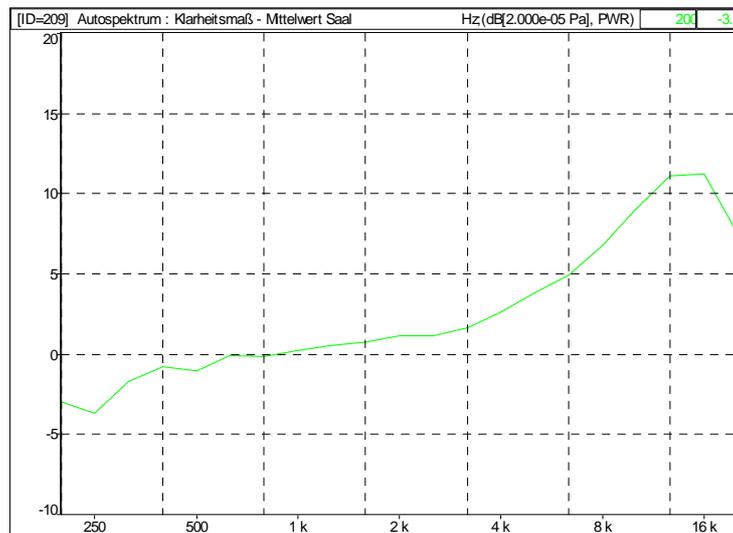


Abb. 3.11: Klarheitsmaß C₈₀ Saal

Für ein ausgewogenes Klangbild im Saal sollte die Balance zwischen Klangdurchmischung und Durchsichtigkeit stimmen, damit einerseits die SängerInnen gut verstanden werden und andererseits das Orchester seinen vollen Klang entwickeln kann. Betrachtet man Abb. 3.11 zusammen mit Tab. 3.5 so ist zu erkennen, dass im für die Sprachverständlichkeit wichtigen Frequenzbereich (ca. 200Hz bis 4000Hz), speziell im oberen Teil (über 1000Hz), positive Klarheitsmaßwerte für einen hohen Grad an Verständlichkeit sorgen. Oberhalb von 8kHz sind kaum mehr Sprachsignale vorhanden, wodurch die dort auftretenden sehr hohen C₈₀-Werte nur minimalen Einfluss auf den Gesang haben werden.

Analysiert man das bei Opern häufig eingesetzte, mittelgroß besetzte Orchester auf dessen Zusammenhang zwischen Frequenzspektrum und Klarheitsmaß so lässt sich feststellen, dass im Grundtonbereich der meisten Orchesterinstrumente (bis ca. 500Hz) eine gute Klangdurchmischung im Saal vorherrscht. Die sehr hohen Klarheitsmaßwerte im mittel- und höherfrequenten Bereich führen jedoch dazu, dass die Durchsichtigkeit für die dort angesiedelten Instrumentengruppen enorm zunimmt, womit sich im Allgemeinen ein nicht so homogener Klang einstellen wird. Was für Opernaufführungen durchaus erwünscht sein kann, führt bei Nutzung als Konzertsaal aber dazu, dass eine fehlende Klangdurchmischung im Saal wahrgenommen wird und dass der damit einhergehende, zu geringe Höhenglanz das Klangbild trübt.

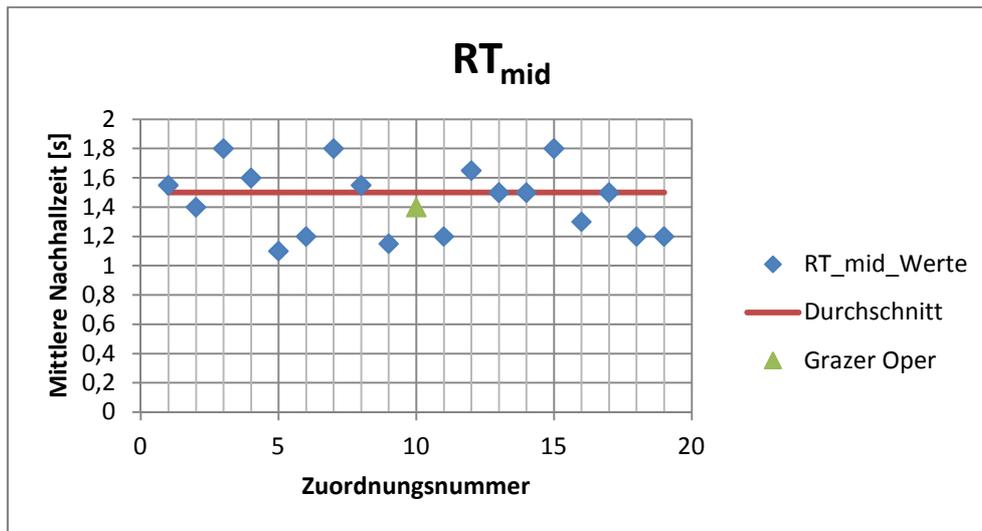
3.3 Vergleich der Messdaten mit anderen Häusern

In einer ersten Gegenüberstellung der Messdaten wird gezeigt, wo die Werte der Grazer Oper im Vergleich mit jenen von 18 bekannten Opernhäusern liegen. Die in Tab. 3.6 angeführten Daten stammen größtenteils von den Untersuchungen Beranek's [BER S.535, 593ff]. Die Werte für die Deutsche Staatsoper in Berlin und für das Opera House in Sydney wurden von Fasold [SUR] übernommen.

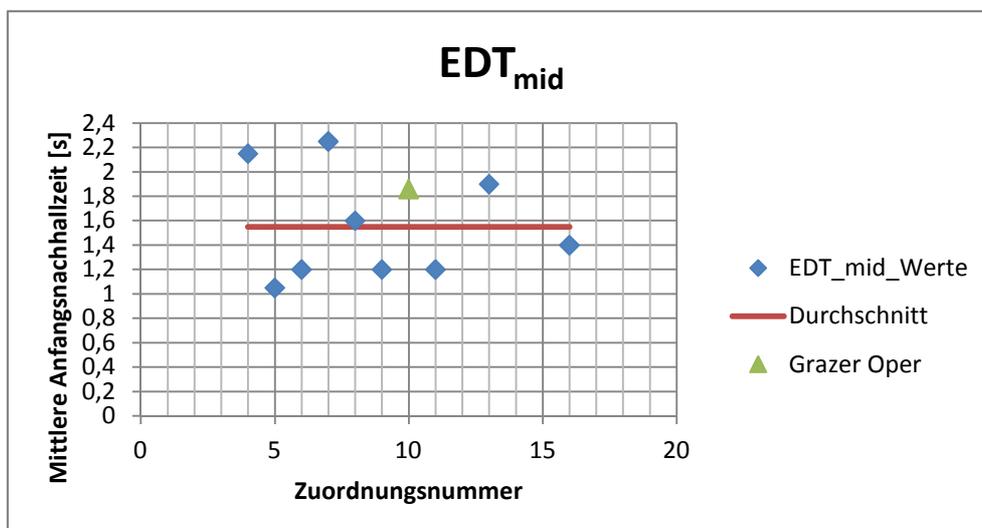
Tab. 3.6: Messdaten bekannter Opernhäuser

Opernhaus	Sitzplätze	Volumen in m ³	RT _{mid} besetzt	EDT _{mid} unbesetzt	C _{80mid} unbesetzt
(1)Bayreuth, Festspielhaus	1800	10308 m ³	1,55 s	-	-
(2)Bloomington, Univ. Auditorium	3718	25545 m ³	1,40 s	-	-
(3)Buenos Aires, Teatro Colón	2487	20570 m ³	1,80 s*	-	-
(4)Costa Mesa, Segerstrom Hall	2994	27800 m ³	1,60 s	2,15 s	-0,53 dB
(5)London, Royal Opera House	2120	12250 m ³	1,10 s	1,05 s	4,50 dB
(6)Milan, Teatro Alla Scala	2289	11252 m ³	1,20 s	1,20 s	3,53 dB
(7)New York, Met. Opera House	3816	24724 m ³	1,80 s	2,25 s	-
(8)Paris, Opéra Bastille	2700	21000 m ³	1,55 s	1,60 s	2,88 dB
(9)Paris, Opéra Garnier	2131	10000 m ³	1,15 s*	1,20 s	2,51 dB
(11)Philadelphia, Academy of Music	2827	15100 m ³	1,20 s	1,20 s	1,89 dB
(12)Rochester, Eastman Theatre	3347	23970 m ³	1,65 s	-	-
(13)Salzburg, Festspielhaus	2158	14020 m ³	1,5 s	1,9 s	-0,85 dB
(14)San Francisco, Opera House	3252	20900 m ³	1,5 s*	-	-
(15)Tokyo, Orchard Hall	1928	17050 m ³	1,8 s	-	-0,91 dB
(16)Vienna, Staatsoper	1709	10665 m ³	1,3 s	1,4 s	1,63 dB
(17)Washington, Kennedy Opera Hse	2142	13027 m ³	1,50 s	-	-
Durchschnittswerte (16 Häuser)	2603	17446	1,50 s	1,55 s	1,63 dB
(18)Berlin, Deutsche Staatsoper	1396	7000 m ³	1,20 s	-	-
(19)Sydney, Opera House	1547	8200 m ³	1,20 s	-	-
(10)Graz, Grazer Oper	1386	7730 m ³	1,40 s	1,86 s	0,68 dB

*geschätzt

Mittlere Nachhallzeit**Abb. 3.12:** Vergleich der Messdaten - Nachhallzeit

In Abb. 3.12 sind die RT_{mid} -Werte aller unter Tab. 3.6 angeführten Opernhäuser eingetragen. Anhand der Zuordnungsnummer sind die exakte Allokation sowie das Ablesen der genauen Messwerte möglich. Wenn man den Durchschnittswert von 1,5s betrachtet, so liegt die Grazer Oper mit einer RT_{mid} von 1,4s knapp darunter. Im Vergleich mit jenen Häusern, die ein ähnlich geringes Volumen wie die Oper aufweisen (Zuordnungsnummern 1,5,6,9,16,18,19), ist dieser Wert mitunter bei den höchsten dabei. Diese Erkenntnis lässt darauf schließen, dass die Klangfülle von instrumentaler und vokaler Musik in der Grazer Oper vergleichsweise besser ist, als bei den eben genannten Häusern.

Mittlere Anfangsnachhallzeit**Abb. 3.13:** Vergleich der Messdaten - Anfangsnachhallzeit

Beim Vergleich der Anfangsnachhallzeiten (Abb. 3.13) ist die Grazer Oper mit einem EDT_{mid} -Wert von 1,86s im oberen Bereich der Grafik angesiedelt. Das Royal Opera House(5), das Teatro Alla Scala(6), die Opéra Garnier(9) und die Wiener Staatsoper(16) besitzen deutlich geringere mittlere Anfangsnachhallzeiten und wirken somit akustisch betrachtet „trockener“, als die Grazer Oper. Bei Verwendung als Aufführungsstätte für Konzertmusik bedeutet dies einen kleinen Vorteil für die Oper, da der empfundene Nachhall, durch die höhere EDT_{mid} , somit länger ist.

Mittleres Klarheitsmaß

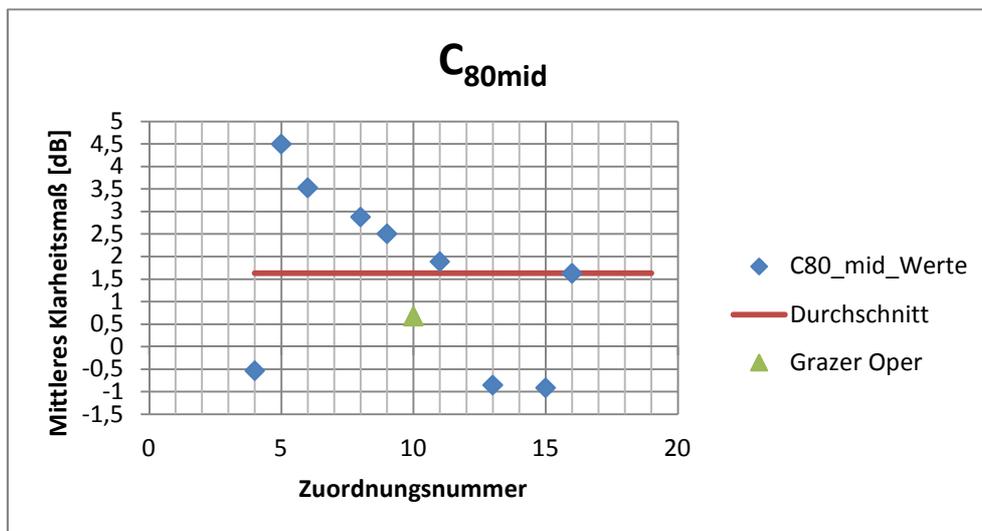


Abb. 3.14: Vergleich der Messdaten - Klarheitsmaß

Die bei Opernhäusern gewünschten, positiven Klarheitsmaßwerte werden von fast allen in Abb. 3.14 ausgewerteten Sälen erreicht. Jene Häuser, die von der Größe her mit der Grazer Oper vergleichbar sind (Teatro Alla Scala(6), Opéra Garnier(9), Wiener Staatsoper(16)), liegen alle über bzw. auf dem Durchschnittswert. Dass die Grazer Oper mit einem C_{80mid} -Wert von 0,68dB klar darunter liegt, ist der hohen Anfangsnachhallzeit bzw. dem statistischen Zusammenhang zwischen Nachhallzeit und Klarheitsmaß zuzuschreiben. Der dennoch positive Wert trägt zur besseren Verschmelzung des Orchesters und zur Klangdurchmischung im Saal bei, wobei eine ausreichende Sprachverständlichkeit der SängerInnen trotzdem gewährleistet bleibt.

3.4 Akustische Situation und bekannte Probleme der Grazer Oper

Am Ende des ersten Teils der raumakustischen Analyse sollen einige der in der Oper durch Dirigenten, Musiker und Zuhörer gemachten Hörerfahrungen aufgelistet und beschrieben werden. Obwohl die Planung und der Bau dieses Gebäudes sehr genau durchdacht und ausgeführt wurden, gibt es dennoch ein paar kleinere Defizite in der Raumakustik, deren Verbesserung zu einem noch ausgewogeneren Klangbild führen würde. Folgenden Probleme bzw. Verbesserungsvorschläge haben sich herauskristallisiert:

- Die mittlere Nachhallzeit der Oper von ca. 1,6 Sekunden im leeren und 1,4s in besetztem Zustand stellt einen guten Wert für die Art und Größe des Raumes dar. Wie bereits aus Kapitel 2.2 bekannt, sollten Opernhäuser im besetzten Zustand eine mittlere RT von 1,3 bis 1,5 Sekunden aufweisen, um ein optimales Hörergebnis erzielen zu können.

Während sich die in der Oper festgestellten Zeiten für Operaufführungen sehr gut eignen, so verlangen konzertante Darbietungen nach einer deutlichen Anhebung dieser Werte. Für durchschnittliche, sinfonische Orchestermusik wird eine mittlere Nachhallzeit von ca. 2 Sekunden (im leeren Zustand) empfohlen. Da in der Grazer Oper des Öfteren auch Konzerte stattfinden sollen, würde eine Verlängerung der Nachhallzeiten die Qualität dieser Darbietungen enorm steigern.

- Der Wunsch nach einer verbesserten Klangdurchmischung im Saal bzw. nach einem verbesserten Envelopment²⁰ wurde ebenfalls angesprochen und könnte durch Anheben des Nachhalls in bestimmten Frequenzbereichen korrigiert werden.
- Neben einer etwas zu geringen Nachhallzeit konnte man durch Hörerfahrungen und Messungen weitere akustische Phänomene in der Grazer Oper feststellen. So ist es nicht nur dem Tonmeister bekannt, dass im Bereich der 4.Reihe in Gangnähe, Flatterechos über die Decke entstehen und diese als störend empfunden werden.
- Des weiteren kommt es in der 7.Reihe rechts und links, in etwa in der Mitte der Sitzreihen, zu sogenannten „Schallfokussierungen“, bei denen Geräusche aus anderen Zuschauerbereichen, oder auch aus dem Orchestergraben durch ungünstige Reflexionen an z.B. der Decke stark gebündelt werden und man so den Eindruck bekommt, als würde jemand von der Galerie „herunter sprechen“ oder z.B. die Oboe gleich neben einem sitzen. Gewölbte Flächen, wie sie vor allem in historischen Bauten, in Kirchen und eben auch in der Oper zu finden sind, können zu solchen unerwünschten „Heraushebungen“ von einzelnen Schallquellen aus einem größeren Schallkörper führen. Auf Grund der Tatsache, dass die Schallquelle dann häufig im fokussierenden Gewölbe lokalisiert wird, gilt dieser Effekt als besonders störend[JUN]. Bei klassischen Opernhäusern ist zusätzlich die hufeisenförmige Form der Ränge akustisch „gefährlich“, da auch hier Fokussierungen in das Parkett und auf

²⁰ Energie, die später als 150ms nach Ende eines Schallreizes bei einem Hörer eintrifft führt zum Empfinden von „Einhüllung“ (Envelopment). [GRIE3]

die Bühne entstehen können. Diese Bündelung versucht man hauptsächlich durch in die Tiefe erarbeitete Raumstrukturen und Ornamentik aufzubrechen. [HEU]

Zur Untersuchung der angesprochenen Flatterechos und Fokussierungseffekte, sowie für eine weiterführende raumakustische Analyse wird nun in Kapitel 4 ein Simulationsmodell der Grazer Oper auf Basis der Akustiksoftware EASE v4.1 erstellt. Mit den Ergebnissen aus dem ersten Teil der raumakustischen Analyse (Kapitel 3) sind genügend Informationen vorhanden, um den in Kapitel 4.3 notwendigen Abgleich zwischen Simulation und realen Raum durchführen zu können.

4 Simulation und weiterführende Analyse

In Kapitel 4 wird ein Modell der Grazer Oper mittels der akustischen Simulationssoftware EASE v4.1 (www.afm.com) erstellt und simuliert. Das dadurch erschaffene, virtuelle Werkzeug zur Vorhersage von Schallfeldverteilungen dient hauptsächlich der weiterführenden raumakustischen Analyse. Den zweiten wichtigen Anwendungsbereich hat die Simulation bei dem unter Kapitel 6 folgenden Planungsprozess von elektroakustischen Verbesserungsmaßnahmen.

4.1 Beschreibung der Simulationssoftware EASE v4.1

Die Akustiksoftware EASE v4.1 wurde für das Windows Betriebssystem konzipiert und bietet sowohl Lautsprecherdesignern, Raumakustikern als auch Beschallungsanlagenplanern ein wichtiges Werkzeug für die Vorhersage von akustischen Ereignissen. Das Programm wurde hauptsächlich für die Simulation von großvolumigen Räumen entworfen, wobei mit der Version 4.1 und höher auch die Konzipierung von kleineren Räumen möglich ist. Des Weiteren findet man im Gesamtpaket der Software verschiedene akustische Planungs- und Analysetools, sowie ein sogenanntes „vision module“ mit dem es möglich ist, Lichtquellen und Oberflächenstrukturen zu definieren, wodurch die Software auch für Architekten äußerst reizvoll ist. Sämtliche Module des Programms können sowohl einzeln, als auch im Gesamtkontext verwendet werden [JBL]. Am folgenden Blockdiagramm (Abb. 4.1) soll die Grundstruktur des Programmes erklärt und ein Verständnis der Beziehungen zwischen den verschiedenen Programmmodulen aufgebaut werden.

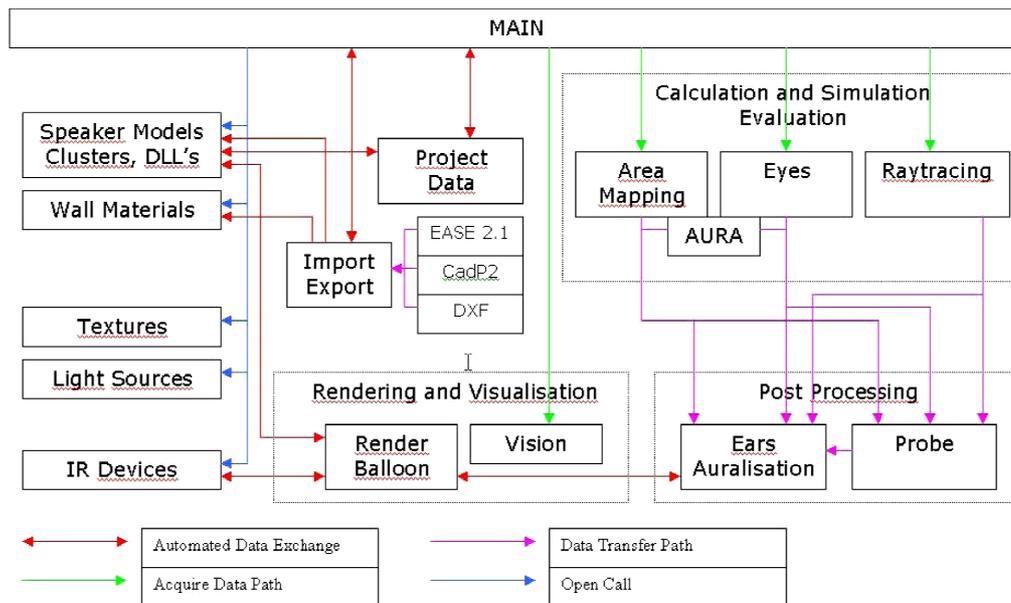


Abb. 4.1: Blockdiagramm der EASE Programmmodule [AO2]

Der modulare Aufbau dieser Software wird über das zentrale Hauptfenster gesteuert. Zur Erstellung eines Raumes wird das Edit-Project-Modul genutzt. Anhand der intuitiven grafischen Oberfläche können recht schnell Räume, Lautsprecherstandorte, Hörerflächen und Zuhörerplätze erstellt werden. Mit der Import/Export Funktion ist es außerdem möglich, Modelle aus CAD Programmen oder früheren Versionen von EASE zu übernehmen. [AO2]

Für die Auswahl der im Modell verwendeten Lautsprecher steht eine offen gehaltene Datenbank zur Verfügung die es dem Nutzer erlaubt, auch eigene Lautsprecherdaten einzugeben und zu speichern. Bei der Simulation werden sämtliche komplexe Strahlerdaten, einschließlich dem Betrag und der Phase, verwendet. Die sehr aufwändige Berechnung von Nahfeldbedingungen oder die Simulation von Line-Arrays wird mit Lautsprecher-DLL's²¹ durchgeführt. Auch das Zusammenfassen mehrerer Lautsprecher zu einem Cluster kann EASE problemlos bewerkstelligen und zusätzlich – neben der Abstrahlcharakteristik von LS – als 3-dimensionale Ballondarstellung ausgeben. [AO1]

Neben der Lautsprecher-Datenbank ist auch eine eigene Material-Datenbank Teil des Programms. Aus ihr heraus erfolgt die Zuweisung von Wandmaterialien zu allen im Editier-Modul erstellten Flächen. Durch Angabe der Absorptionskoeffizienten und der Diffusitätswerte sind sowohl allgemeine Materialien wie Glattputz, Stühle, Böden oder Publikum, als auch herstellereigene Absorberelemente vorhanden. Die offene Datenbank erlaubt auch hier das Einfügen und Editieren nutzerspezifischer Materialdaten. Als Komplementierung bei der Erstellung des Modells können sowohl Lichtquellen, als auch Infrarotstrahler in den Raum eingebaut und simuliert werden. Mit der Definition von Oberflächenstrukturen erhält der Raum auch die für Architekten interessante visuelle Komponente. [AO1]

²¹ DLL.....Dynamic Link Library; bezeichnet allgemein eine dynamische Bibliothek

Mit den Programmmodulen EASE-Eyes und EASE-Vision gibt es gleich zwei Möglichkeiten für die räumliche Darstellung des Modells. Mit dem EYES-Modul wird die korrekte Eingabe des Raumes, die Darstellung von einzelnen Elementen und das Ein- und Ausschalten von Hörerflächen oder Lautsprechern kontrolliert. Als wichtiges Feature in diesem Modul gilt das 3D-Mapping. Hierbei wird unter Verwendung des AURA-Berechnungstools die Abbildung von akustischen Parametern nicht nur auf Hörer-, sondern auch auf Raumbegrenzungsflächen 3-dimensional möglich. Das EASE-Vision-Modul ist für eine besonders realistische Raumdarstellung gedacht, da dort mit hochauflösender Rendertechnik gearbeitet wird und man durch die Texturen und Lichtquellen eine gewisse „Echtheit“ des Raumes erzeugen kann. Die Walker-Funktion ermöglicht es einem, sowohl im EASE-Vision, als auch im EASE-Eyes aus dem Blickwinkel von verschiedenen Objekten (Hörerplatz, Lautsprecherstandort, etc.) den Raum zu betrachten. [AO1]

Für die Berechnungen und Auswertungen der Simulationsergebnisse stehen in EASE mehrere Optionen zur Verfügung. Das Standard AREA-MAPPING-Modul kann für die ausgewählten Hörerflächen farbige 2D-Karten (Mappings) von akustischen Parametern berechnen. Es werden für die Simulation die Richtcharakteristiken der einzelnen Schallquellen berücksichtigt und die Frequenzbereiche getrennt berechnet. [AO1]

Mit dem Rechenmodul AURA, welches auf den CAESAR-Algorithmen der Universität Aachen aufbaut und welches standardmäßig die Raytracing-Methode verwendet, wird bei der Berechnung der Echogramme und der Raumimpulsantworten auch die Diffusität berücksichtigt. Sämtliche raumakustische Maße, gemäß ISO 3382, können in 2D-Mappings (mit AREA MAPPING) oder 3D-Mappings (mit EYES) dargestellt werden. [AO1]

Im sogenannten Raytracing-Modul kann man für die Berechnung der Raumimpulsantworten zwischen der Strahlenverfolgungs- und der Spiegelquellenmethode auswählen. Neben der Richtwirkung der Schallquellen werden bei der Strahlenverfolgungsmethode (Raytracing) auch die Absorptions- und Diffusitätseigenschaften der Flächen und die Luftabsorption berücksichtigt. Beim Raytracing kann das Reflexionsmuster von Flächen geprüft und sitzplatzbezogene Raumimpulsantworten berechnet werden. Sogar die visuelle Verfolgung der Schallstrahlen ist möglich. [AO1]

Die letzten beiden zu erklärenden Programmteile sind die Probe-Funktion und das Auralisations-Modul. Mit der Probe-Funktion kann in EASE eine „akustische Probe“ an einer willkürlichen Hörerplatzposition genommen werden. Es werden dabei die wichtigsten akustischen Auswertungsparameter sowie die für die Auralisation benötigten Transferalgorithmen berechnet. Im Vergleich mit einer AURA-Simulation, wo ebenfalls die zur Auralisation zu verwendenden Ergebnisse berechnet werden, ist die Probe-Funktion zeitlich gesehen sehr viel schneller. Mit dem Auralisations-Modul ist es nun möglich, die Schallquellen im simulierten Raum hörbar zu machen. Grundlage hierfür sind die vorher berechneten Raumimpulsantworten, welche mit den Außenohr-Übertragungsfunktionen (HRTF's²²) gefaltet werden und somit ein Paar von binauralen Raumimpulsantworten liefern. Für die Wiedergabe im simulierten Raum wird dann ein nachhallfreies Audiobeispiel benutzt. [AO1]

²²engl.: Head Related Transfer Functions

4.2 Erstellung des Simulationsmodells

Nachdem unter Punkt 4.1 die Programmstruktur erläutert und die wichtigsten Funktionen von EASE zusammengefasst und erklärt wurden, konnte nun mit dem Aufbau des Simulationsmodelles begonnen werden.

4.2.1 Geometrische Erfassung von Raumpunkten

Da keine vollständigen Pläne der Grazer Oper mit genauen Maßangaben zur Verfügung standen, war einer der ersten und zugleich auch aufwändigsten Punkte die geometrische Vermessung des Innenraumes der Oper mittels eines Laserentfernungsmessgerätes. Die aus dem Archiv der Oper stammenden, teilweise handgezeichneten Pläne des Architekten (Abb. 4.2 und Abb. 4.3) dienten dabei als Anhaltspunkt zur Bestimmung der wichtigsten Messpositionen.

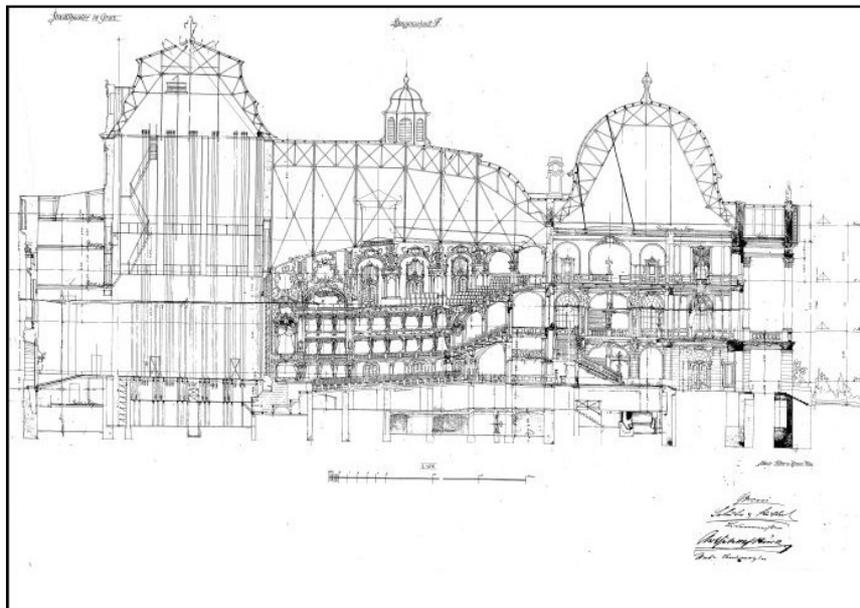


Abb. 4.2: Handgezeichneter Plan der Grazer Oper (Seitenriss) [AGO]

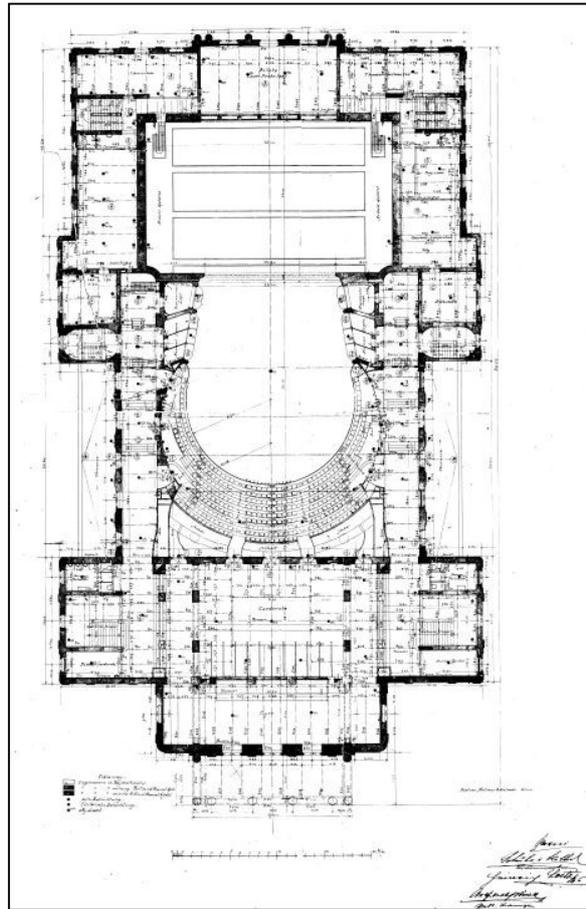


Abb. 4.3: Handgezeichneter Plan der Grazer Oper (Grundriss) [AGO]

Für eine bessere Orientierung wurde zu Beginn des Ausmessens ein kartesisches Koordinatenkreuz in den Raum gelegt, von wo aus die x-, y- und z- Abstände zu markanten Punkten gemessen und festgehalten wurden. Durch diese 3-dimensionale Erfassung der Raumgeometrie sollte es später leichter fallen das Simulationsmodell zu erstellen. Mit der Erhebung von 623 Raumpunkten war eine ausreichende Anzahl von geometrischen Daten für die Erstellung eines möglichst originalgetreuen Modells vorhanden.

Zur besseren Vorstellung wird in Abb. 4.4 bereits das EASE 3D-Gitternetzmodell der Grazer Oper (ohne Dach) mit dem eingezeichneten kartesischen Koordinatenkreuz (x-Achse; y-Achse; z-Achse) gezeigt.

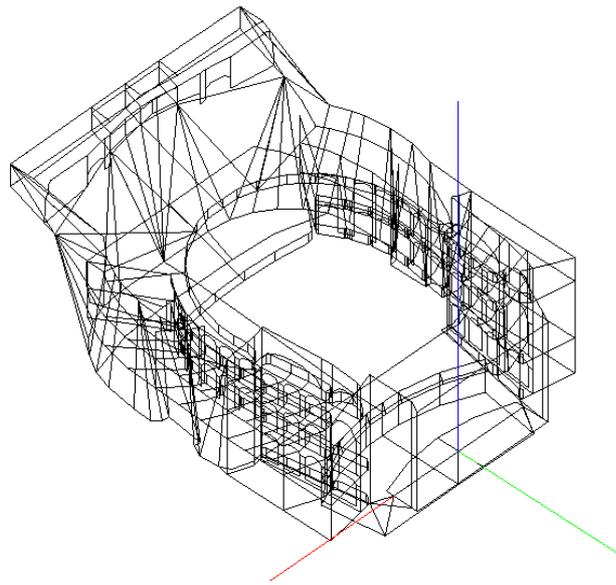


Abb. 4.4: 3D-Gitternetzmodell der Grazer Oper erstellt mit EASE v4.1

4.2.2 Eingabe der Raumdaten

Für die Erzeugung 3-dimensionaler Objekte in EASE müssen Eckpunkte bzw. markante Punkte des Raumes in Form von kartesischen Koordinaten eingegeben werden. Da die geometrische Erfassung von Raumpunkten bereits diese Daten lieferte, mussten sie im Editier-Modul nur mehr eingegeben werden. Eine große Hilfe hierbei lieferte die Symmetriefunktion, bei der man eine Spiegelungsachse bestimmen konnte und alle Eingaben einer Seite auf die andere Seite automatisch übertragen werden. Durch anschließende Verbindung dieser Punkte zu sogenannten „Flächen“ und durch horizontales bzw. vertikales Anordnen dieser, entstand nach und nach das Drahtgittermodell des Raumes. Als einer der heikleren Punkte bei der Modellierung stellte sich heraus, dass gekrümmte Flächen oder Wände nur durch ihre Zerlegung in viele kleinere Flächen erzeugt werden können. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass im Modell nicht alle Zwischenwände bzw. Flächen zu 100% exakt vermessen und berücksichtigt wurden, da dies einen immensen Mehraufwand bedeutet hätte und es für den Zweck dieser Arbeit nicht zwingend nötig war. Da nur das akustische Verhalten im Zuhörerraum interessiert, wurde die Bühnenöffnung mit einer Fläche verschlossen, wobei die Eingabe der Absorptionskoeffizienten nach Vorgabe von Fasold [SUR] erfolgte.

Insgesamt besteht das Grundmodell mit geschlossenem Bühnenvorhang aus 1376 Punkten und 666 Flächen. Abb. 4.5, Abb. 4.6 und Abb. 4.7 zeigen jeweils das fertige Drahtgittermodell der Oper mit abgenommenem Dach aus verschiedenen Blickrichtungen.

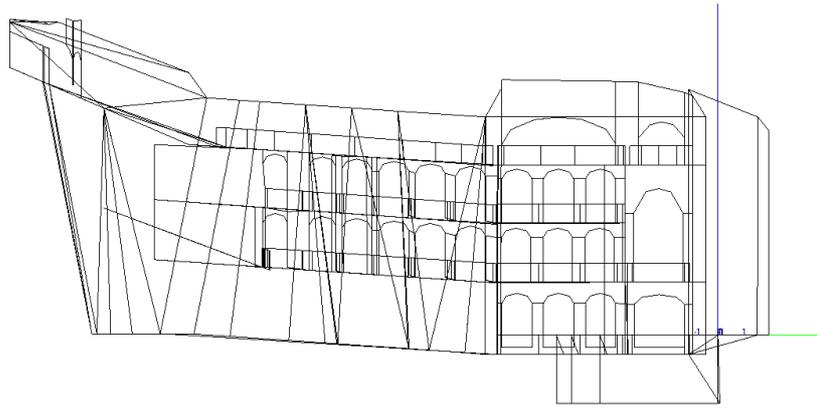


Abb. 4.5: EASE Drahtgittermodell der Oper ohne Dach (x-Ansicht)

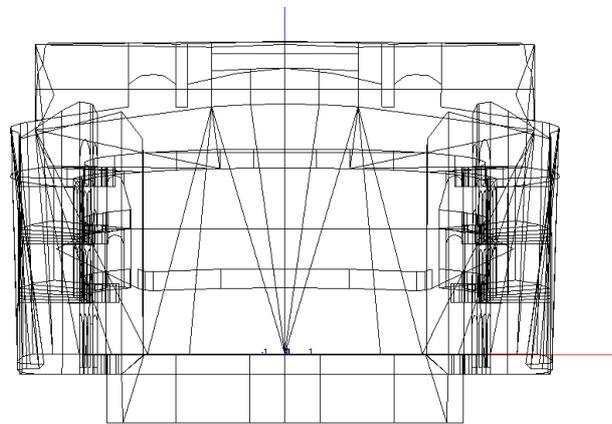


Abb. 4.6: EASE Drahtgittermodell der Oper ohne Dach (y-Ansicht)

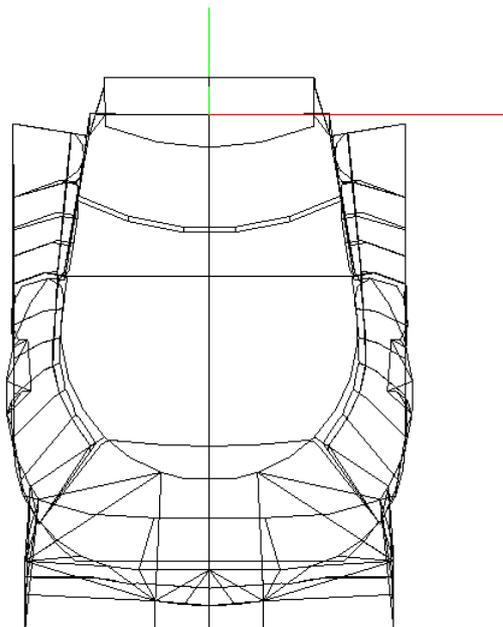


Abb. 4.7: EASE Drahtgittermodell der Oper ohne Dach (z-Ansicht)

4.2.3 Zuweisung von Wandmaterialien/Wandstrukturen

Nachdem das Modell in seiner Basis fertig aufgebaut war, konnte mit der Zuweisung von passenden Wandmaterialien begonnen werden. Für einen besseren Überblick und zur Vereinfachung des Modells wurden im Vorhinein die Flächen von zusammengehörigen Bereichen wie z.B. die Stuckdecke, die Fußböden, die Logenfronten, usw. zu sogenannten „Objekten“ zusammengefasst.

Um ein möglichst originalgetreues akustisches Verhalten der Grazer Oper nachbilden zu können, ist es bei der Simulation unabdinglich die reflektierenden Wandeigenschaften aller Flächen anhand der beiden Parameter Absorption und Diffusität so exakt wie möglich einzugeben. Da EASE über eine eigene, offene Material-Datenbank verfügt, wurden im Grundmodell hauptsächlich Wandmaterialien aus diesem Pool verwendet und den verschiedenen Objekten und Flächen zugewiesen. Falls spezielle Strukturen in dieser Datenbank nicht vordefiniert waren, wurde diese neu erstellt oder bereits vorhandene editiert und gespeichert. In Abb. 4.8 und Abb. 4.9 sind beispielhaft die Absorptions- bzw. Diffusitätswerte für das Material „PARKETT“ dargestellt. Im Modell wurde dieses Wandmaterial z.B. dem Boden im Erdgeschoss zugewiesen. Abb. 4.10 zeigt zusätzlich alle im Grundmodell verwendeten Materialien.

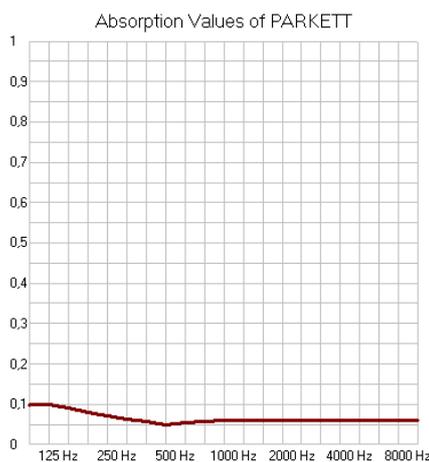


Abb. 4.8: Bsp. Absorptionskoeffizienten Parkettboden

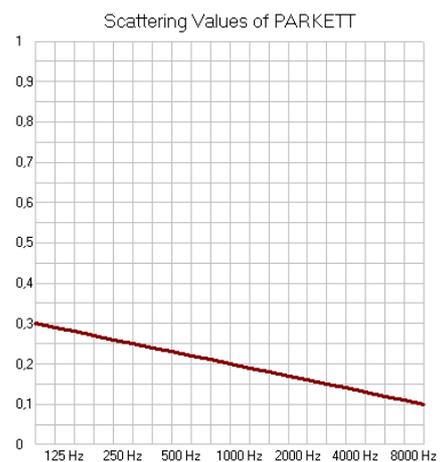


Abb. 4.9: Bsp. Diffusitätswerte Parkettboden

#	G	Item	Color	A 100Hz	A 125Hz	A 160Hz
1		Absorber_Mittel	0	0.02	0.02	0.02
2		GLATTBETON	16777088	0.01	0.01	0.01
3		Sinus_diffusor_1m-2Wellen		0.00	0.00	0.00
4		Bühnenöffnung	7303167	0.40	0.40	0.40
5		STUGIPS 1	12698049	0.02	0.02	0.02
6		WOOD FLR	12698049	0.18	0.18	0.16
7		CARPT COMM	8467169	0.03	0.03	0.04
8		GLATTPUTZ	12698049	0.02	0.02	0.02
9		PARKETT	12698049	0.10	0.10	0.09
10		GEPOLSTZ1	12698049	0.09	0.10	0.12
11		WOODFLR CP	12698049	0.20	0.20	0.18
12		DINNSTOFF	12698049	0.04	0.04	0.04
13		GLATTPUTZ mit dünnem Stoffüberzug	12698049	0.02	0.02	0.02

Abb. 4.10: EASE Wandmaterialienliste des Modells

4.2.4 Erstellen von Sitzflächen/Hörerflächen

Die Nachbildung der Zuhörerbereiche wurde im Modell durch die Erstellung von sogenannten „Sitzflächen“ realisiert, wobei als Muster der bereits aus Kapitel 3 bekannte Sitzplan der Grazer Oper (siehe Abb. 3.3) diente. Der große Vorteil dieser „Seating Areas“ ist jener, dass auf deren in den Raum exponierten Seite ein Material aufgebracht werden kann, das eine dem Publikum entsprechende Absorptionscharakteristik aufweist und somit die Simulation verschiedener Besetzungszustände möglich macht [AO]. Da die raumakustische Vermessung der Oper im unbesetzten Zustand durchgeführt wurde und für den späteren Abgleich zwischen Simulation und Messung (Kapitel 4.3) die gleichen Besetzungszustände gelten sollten, wurde für die Sitzflächen das Material „Gepolsterte Sitze“ ausgewählt.

Als Hörerflächen werden in EASE jene imaginären Ebenen bezeichnet, die vorzugsweise über den Sitzflächen eines Raumes angebracht werden und auf die das Programm all seine akustischen Berechnungen farblich abbilden kann. Standardmäßig befinden sich diese Hörerflächen auf einer Höhe von 1,2m über der ausgewählten Fläche, da dieser Höhenabstand der Ohrenhöhe von sitzenden Zuhörern entspricht [AO2]. Der Beschreibung des Programmes nach müssen die „Audience Areas“ eine 4-eckige Form haben, da die von EASE für seine Mappingfunktion verwendete Abtastroutine sonst nicht richtig funktioniert. Aus diesem Grund wurden beim Modell über alle relevanten Zuhörerbereiche 4-seitige Hörerflächen eingefügt, auf denen sämtliche akustischen Simulationen abgebildet werden können. In der Abbildung 4.11 sind die „Audience Areas“ im Modell grün markiert.

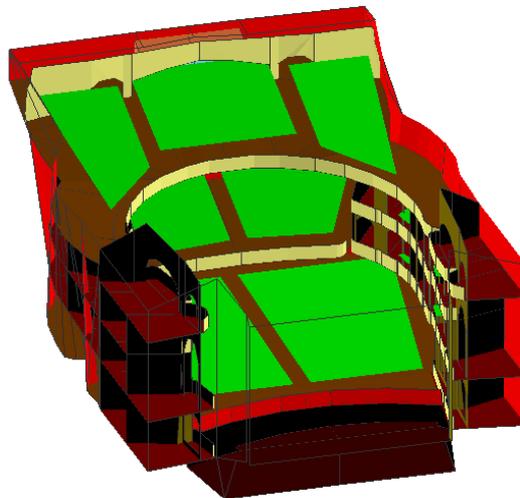


Abb. 4.11: EASE Hörerflächen des Modells

4.2.5 Erstellen von Hörerplätzen/Kalibrierpositionen

Da bei der akustischen Vermessung der Oper alle Messpositionen exakt dokumentiert wurden, konnte nun beim Simulationsmodell genau an jenen Stellen ein als „Hörerplatz“ bezeichneter Testpunkt eingefügt werden. Diese „Listener Seats“ machen es möglich, dass

mit dem Modul „Aura“ und der Rayracing-Technik auch punktuelle Simulationsergebnisse erstellen werden können und dadurch die Rechenzeit bzw. Simulationszeit sehr niedrig gehalten werden kann [AO2]. Für die unter Kapitel 4.3 durchgeführte Kalibrierung des Simulationsmodells stehen somit alle in Tab. 3.1 dokumentierten Messpositionen zur Verfügung. Zu sehen sind die im Modell erstellten Hörerplätze in Abb. 4.12.

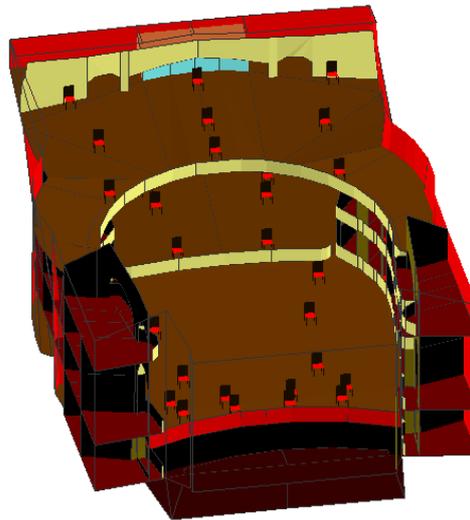


Abb. 4.12: EASE Hörerplätze des Modells

4.3 Kalibrierung und erste Simulationsergebnisse

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen wurde das EASE Modul „AURA“ verwendet. Die Anzahl der ausgesendeten Strahlen betrug 100 000 pro Quelle und die virtuellen Schallquellen mit kugelförmiger Abstrahlcharakteristik standen auf denselben, wie bei der Messung verwendeten Positionen (siehe Tab. 3.2). Inwiefern das Modell die Ergebnisse der raumakustischen Messung widerspiegeln kann, wird beim Vergleich der raumakustischen Parameter Nachhallzeit, Anfangsnachhallzeit und Klarheitsmaß gezeigt. Für die Gegenüberstellung im Bereich des Parketts wurden die zentralen Messpositionen M11, M12, M13 und M14 zusammengefasst und gemittelt. Die Mess- bzw. Simulationsergebnisse vom Balkon ergaben sich aus der Mittelung der Positionen Z2 und Z5 und für die Daten der Galerie wurden die Werte von MP Y4, Y7 und Y8 verwendet (exakte Angaben zu den Messpositionen siehe Tab. 3.1).

Die ersten Simulationsergebnisse haben gezeigt, wie weit das Grundmodell vom tatsächlichen Raum abweicht bzw. welche Verbesserungen beim Modell durchgeführt werden müssen (dokumentiert und zu sehen in den Abb. 4.13 bis 4.21). Mit der Kalibrierung wurde versucht durch Veränderung von bestimmten Parametern, das akustische Verhalten des Modells an jenes vom „wahren“ Raum exakter anzupassen. Die zwei Größen, mit denen bei der Feinjustierung hauptsächlich gearbeitet wurden, sind der Absorptionskoeffizient und der

Streufaktor (Diffusität). Da die genauen Absorptionsgrade einiger Teilflächen der Grazer Oper nicht bekannt waren und dafür im ersten Ansatz „nur“ ähnliche Materialien aus der programmeigenen Datenbank eingesetzt wurden, konnten in diesem Bereich noch Veränderungen vorgenommen werden. Für die Feinabstimmung des Reflexionsverhaltens verschiedener Wandstrukturen diente im Modell der Materialparameter „Scattering Values“. Durch Adaption der Diffusität von bestimmten Oberflächenstrukturen (z.B. der Stuckdecke, der Balkonbrüstung, der Logenfassade etc.) konnte eine exaktere Übereinstimmung zwischen den Simulations- und den Messergebnissen erzielt werden (zu sehen in Abb. 4.13 bis 4.21). Folgende Zusammenhänge zwischen den Parametern Absorptionsgrad, Streufaktor, Nachhallzeit, Anfangsnachhallzeit und Klarheitsmaß konnten während der Kalibrierung festgestellt werden:

- Bei Erhöhung der Diffusität steigen die RT-Werte minimal und die EDT-Werte etwas stärker an. Das Klarheitsmaß nimmt hingegen ab.
- Bei Verringerung der Diffusität fallen die RT minimal und die EDT etwas stärker ab. Die Klarheit nimmt zu.
- Wird der Absorptionsgrad erhöht, fallen die RT- und die EDT-Werte gleichermaßen ab. Das Klarheitsmaß steigt an.
- Ein verringerter Absorptionsgrad lässt die Nachhallzeit und die Anfangsnachhallzeit im gleichen Verhältnis ansteigen. Die Klarheit geht zurück.

In Tab. 4.1 sind diese Beobachtungen nochmals grafisch zusammengefasst.

Tab. 4.1: Parameterzusammenhänge bei der Kalibrierung

RT	EDT	C ₈₀	α	scatt
minimal ↑	↑	↓	-	↑
minimal ↓	↓	↑	-	↓
↓	↓	↑	↑	-
↑	↑	↓	↓	-

Zur Qualitätsbeurteilung der Kalibrierung wird an dieser Stelle die Kennzahl ΔK eingeführt, die ebenso ein Maß für die Güte des Modells darstellt. Die Berechnung dieses Einzahlwertes erfolgt durch das Aufsummieren der Beträge der einzelnen Abweichungen zwischen den Simulations- und Messwerten und durch anschließende Mittelung über die Anzahl der Frequenzbänder. Wird ΔK vor und nach der Kalibrierung miteinander verglichen kann gezeigt werden, ob und um wie viel eine Verbesserung bzw. Verschlechterung des Modells durch die Feinabstimmung erreicht wurde. Zusätzlich gilt: Je niedriger die Kennzahl ΔK , desto geringer sind die Abweichungen zwischen Modell und realem Raum bzw. desto besser ist die Simulation. Beim Vergleich der Nachhallzeiten im Parkett (Kapitel 4.3.1) wird die Berechnung von ΔK einmalig exemplarisch durchgeführt, während bei allen weiteren in den Kapiteln 4.3.1 bis 4.3.3 durchgeführten Analysen die ΔK -Werte in Form von Tabellen nur mehr angegeben werden.

Die in den folgenden Abbildungen (Abb. 4.13 bis 4.21) dargestellten Ergebnisse zeigen einen Vergleich zwischen den gemessenen Werten und den vor und nach der Kalibrierung simulierten Daten. Anhand dieser Gegenüberstellungen und mit der neu eingeführten Kennzahl ΔK sind eine Beurteilung der Modellveränderungen durch die Kalibrierung sowie eine allgemeine Qualitätseinschätzung der Simulation möglich.

4.3.1 Simulationsergebnisse Parkett

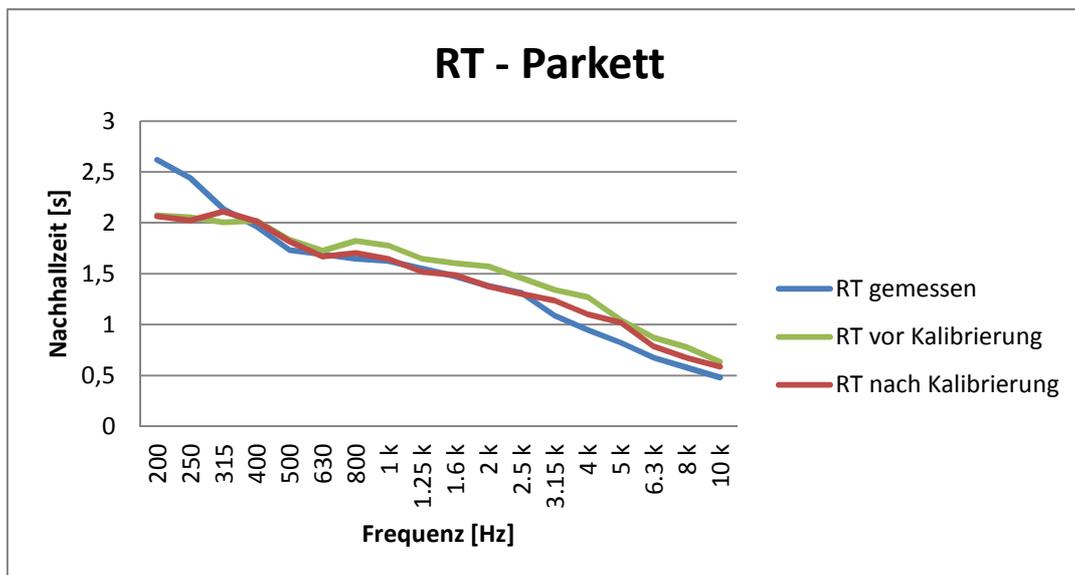


Abb. 4.13: RT-Vergleich zwischen Messung und Simulation (Parkett; vor und nach der Kalibrierung)

Der RT-Vergleich im Parkett (Abb. 4.13) lässt erkennen, dass für diesen Publikumsbereich die RT-Zeiten des Grundmodells im Bereich über ca.500Hz zu hoch sind, während unter 315Hz zu geringe Werte simuliert werden. Nachdem dieser Verlauf bei allen RT-Simulation vor der Kalibrierung feststellbar ist (vgl. Abb. 4.16 und 4.19), sollte eine den ganzen Saal betreffende Überarbeitung des Absorptionsverhaltens – in diesen Frequenzbereichen – eine Verbesserung bringen. Hauptansatzpunkt sollte hierbei die Überprüfung der verwendeten Wandmaterialien und Anpassung bzw. Neuzuweisung passenderer Baustoffe sein.

Nach der Kalibrierung des Modells konnten die Nachhallzeiten im Bereich von 630Hz bis 5kHz sichtbar gesenkt werden. Bei den Frequenzen über 2,5 kHz produziert die Simulation dennoch zu hohe Werte. Warum nicht versucht wurde, die geringfügig zu hohen Nachhallzeiten in den oberen Frequenzbändern noch besser zu korrigieren liegt in der Tatsache, dass diese Werte am Balkon und in der Galerie sehr gut übereinstimmen (zu sehen in Abb. 4.16 und Abb. 4.19). Bei den tiefen Frequenzen (unter 315Hz) war die mit der Kalibrierung erwünschte Anhebung der RT nicht möglich. Nach mehreren Simulationsversuchen stellte sich heraus, dass ein technischer Fehler des Programmes dies nicht zuließ.

In Kapitel 4.3 wurde die Kennzahl ΔK eingeführt, anhand welcher eine wertebezogene Qualitätsbeurteilung der Kalibrierung durchgeführt werden kann. Am Beispiel der Nachhallzeiten im Parkett wird die Berechnung von ΔK und der additiv eingeführten prozentuellen Abweichung vom Mittelwert der Messergebnisse einmalig vollständig gezeigt.

Berechnungen der Kennzahlen ΔK

Tab. 4.2: Berechnungen der Kennzahlen ΔK am Bsp. RT - Parkett

Frequenz in Hz	Betrag von RT gemessen in s	Betrag von RT vor Kalib. in s	Betrag der Abweichung vor Kalib. in s	Betrag von RT nach Kalib. in s	Betrag der Abweichung nach Kalib. in s
200	2,62	2,08	0,55	2,07	0,56
250	2,44	2,05	0,39	2,02	0,42
315	2,14	2,01	0,13	2,11	0,02
400	1,96	2,02	0,06	2,01	0,05
500	1,73	1,83	0,10	1,82	0,08
630	1,69	1,73	0,03	1,67	0,02
800	1,65	1,82	0,18	1,70	0,05
1000	1,63	1,78	0,15	1,64	0,02
1250	1,55	1,65	0,10	1,52	0,03
1600	1,48	1,60	0,13	1,49	0,01
2000	1,38	1,57	0,19	1,38	0,01
2500	1,31	1,46	0,15	1,30	0,01
3150	1,09	1,34	0,25	1,24	0,15
4000	0,95	1,27	0,32	1,10	0,16
5000	0,82	1,05	0,22	1,02	0,20
6300	0,68	0,87	0,20	0,79	0,11
8000	0,58	0,78	0,20	0,67	0,10
10000	0,48	0,64	0,16	0,59	0,11
Mittelwert	1,45				
Summe			3,51		2,11
ΔK			0,19		0,12

ΔK ähnelt dabei statistisch gesehen sehr stark der mittleren absoluten Abweichung mit dem einzigen Unterschied, dass als Bezugswert der Mittelwert einer anderen Datenreihe (in diesem Fall die Messergebnisse) herangezogen wurde. Wird der Mittelwert über die Beträge der gemessenen Zahlen als 100% angenommen, so kann zusätzlich für ΔK die prozentuelle mittlere Abweichung vom Durchschnittswert der absoluten Werte bestimmt werden. Für die Nachhallzeit im Parkett sieht diese Berechnung wie folgt aus:

$RT_{\text{Mittelwert}}$	1,45s.....	100,0 %
$\Delta K_{\text{vor der Kalibrierung}}$	0,19s.....	13,1 %
$\Delta K_{\text{vor der Kalibrierung}}$	0,12s.....	8,3 %

Zusammenfassend wird für die Nachhallzeit im Parkett eine Tabelle mit den Kennzahlen ΔK , sowie den daraus abgeleiteten prozentuellen durchschnittlichen Abweichungen vom absoluten Mittelwert der gemessenen Nachhallzeiten erstellt.

Tab. 4.3: Kennzahlen ΔK für die RT - Parkett

		Prozentuelle Abweichung vom absoluten Mittelwert der Messung
ΔK vor der Kalibrierung	0,19 s	13,1%
ΔK nach der Kalibrierung	0,12 s	8,3%

Aus Tab. 4.3 kann herausgelesen werden, dass die mittlere Abweichung der Nachhallzeiten durch die Feinabstimmung des Modells von 0,19 auf 0,12s verbessert werden konnte. Dies bedeutet, dass nach der Kalibrierung die durchschnittliche Abweichung vom absoluten Mittelwert nur mehr bei 8,3% liegt. Nachdem in der Literatur RT-Toleranzen von +/- 20% bei computerbasierten Simulationen akzeptiert werden, kann davon ausgegangen werden, dass zumindest im Bereich des Parketts das Modell sehr gute RT-Ergebnisse liefert.

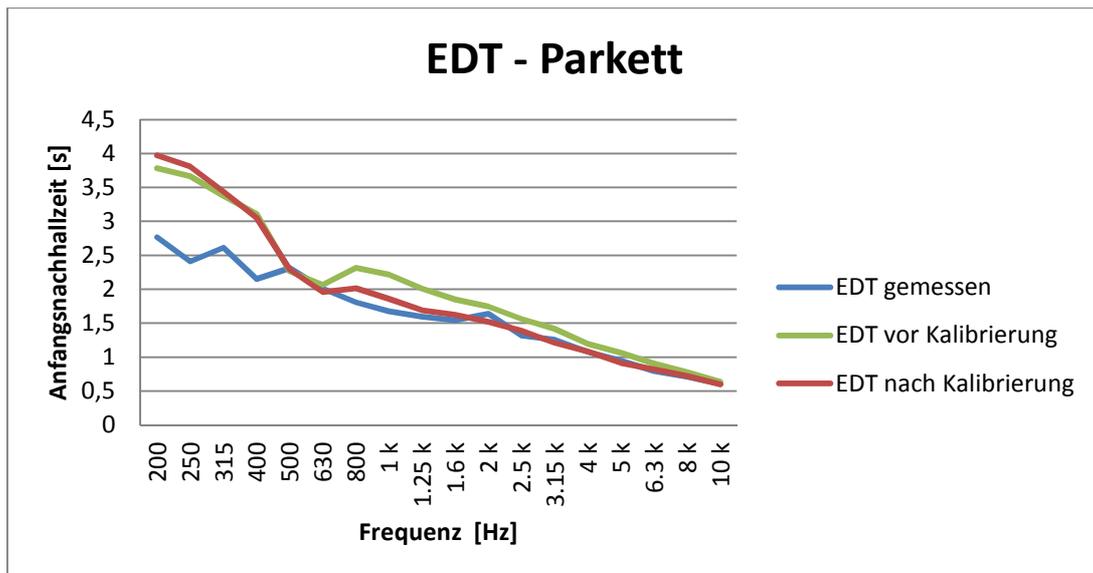


Abb. 4.14: EDT-Vergleich zwischen Messung und Simulation (Parkett; vor und nach der Kalibrierung)

Bei der Analyse der Anfangsnachhallzeiten im Parkett (Abb. 4.14) zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Nachhallzeit. Die bei der Kalibrierung angestrebte Absenkung der RT-Werte über 630Hz ließ auch die EDT-Zeiten zwischen 630Hz und 10kHz markant abnehmen. Im Bereich unter 500Hz sollte bei gleichzeitiger Anhebung der RT die EDT sinken. Trotz Veränderung der frequenzabhängigen Diffusität bei speziellen, das Reflexionsmuster des Parketts bestimmenden Flächen und trotz Überarbeitung der parkettnahen Wandstrukturen konnten unter 500Hz keine Verbesserungen erreicht werden.

Tab. 4.4: Kennzahlen ΔK für die EDT - Parkett

		Prozentuelle Abweichung vom absoluten Mittelwert der Messung
ΔK vor der Kalibrierung	0,38 s	23,5 %
ΔK nach der Kalibrierung	0,29 s	17,9 %

Die EDT-Werte im Parkett weichen vor der Kalibrierung im Schnitt um 0,38s von den Messwerten ab (siehe Tab. 4.4). Mit der Feinjustierung gelang eine Verbesserung der Simulationsergebnisse um 5,6% auf 17,9%. Die im Vergleich zu den RT-Werten größere Abweichung ist durch den erheblichen EDT-Unterschied bei den Frequenzen unter 500Hz erklärbar (siehe Abb. 4.14). Würde man das ΔK für den Frequenzbereich 500Hz bis 10kHz neu berechnen wäre eine deutlich geringere Abweichung feststellbar.

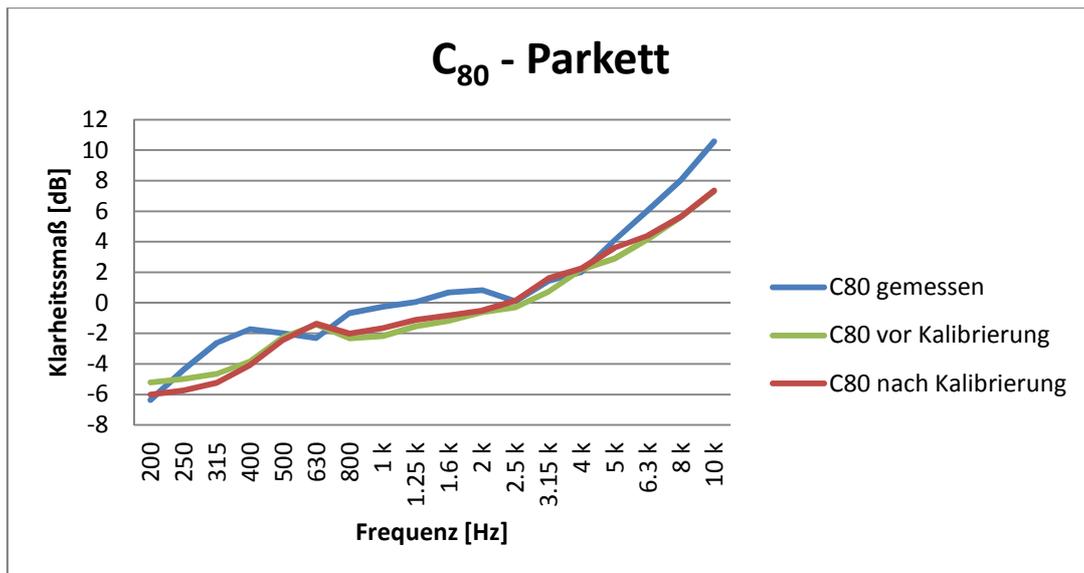


Abb. 4.15: C₈₀-Vergleich zwischen Messung und Simulation (Parkett; vor und nach der Kalibrierung)

Beim Klarheitsmaß (Abb. 4.15) konnte die mit der Feinabstimmung erwünschte Anhebung der C₈₀-Werte zwischen 630 und 2500Hz, sowie die Anhebung oberhalb von 5kHz und unterhalb von 630Hz nur bedingt erreicht werden. Zwischen 630Hz und 5kHz sind minimal bessere Werte erkennbar, obwohl sich die RT- und die EDT-Werte in diesem Bereich um ca. 0,15s gesenkt haben und durch den inverse Zusammenhang zwischen Klarheitsmaß und Nachhall- bzw. Anfangsnachhallzeit eine deutlichere Verbesserung zu erwarten gewesen wäre. Bei den tiefen Frequenzen (< 500Hz) dominiert der Verlauf der EDT ganz deutlich das Verhalten des C₈₀.

Tab. 4.5: Kennzahlen ΔK für das C₈₀ - Parkett

		Prozentuelle Abweichung vom absoluten Mittelwert der Messung
ΔK vor der Kalibrierung	1,38 dB	45,8 %
ΔK nach der Kalibrierung	1,27 dB	42,2%

Die Auswertung von Tab. 4.5 bestätigt, dass beim simulierten Klarheitsmaß im Parkett nur geringe Verbesserungen durch die Kalibrierung erzielt werden konnten. Das ΔK senkte sich um 0,11dB auf 1,27dB. In Relation zum absoluten Mittelwert der Messung bedeutet dies eine gesteigerte Anpassung des Modells an den wahren Raum um 3,6%.

4.3.2 Simulationsergebnisse Balkon

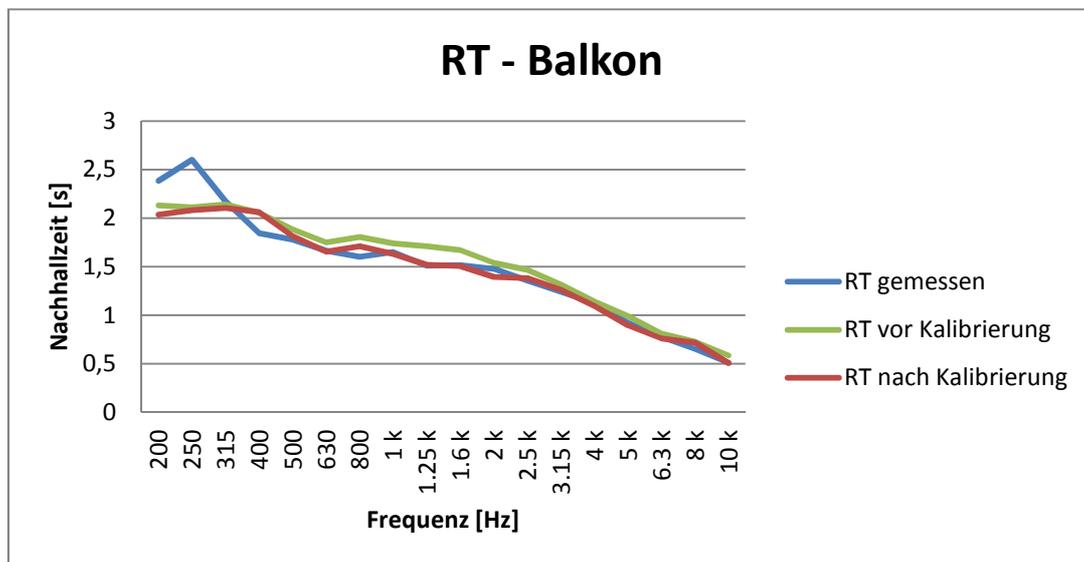


Abb. 4.16: RT-Vergleich zwischen Messung und Simulation (Balkon; vor und nach der Kalibrierung)

Am Balkon sind bei der Simulation der Nachhallzeiten vor der Kalibrierung größere Abweichungen unter 315 Hz und über 630 Hz erkennbar (Abb. 4.16). Die bei der RT-Analyse im Parkett (Abb. 4.13) angesprochene allgemeine Überarbeitung der Materialauswahl führte am Balkon dazu, dass nach der Kalibrierung die simulierten und die gemessenen RT-Werte beinahe ident sind. Von 500 Hz bis 3,15 kHz konnte mit der Adaptierung des Modells die RT um das erwünschte Maß gesenkt werden. Bis auf den bereits erwähnten technischen Simulationsfehler bei Frequenzen unter 315 Hz kann die Simulation das akustische Nachhallverhalten im Bereich des Balkons außerordentlich gut nachbilden.

Tab. 4.6: Kennzahlen ΔK für die RT - Balkon

		Prozentuelle Abweichung vom absoluten Mittelwert der Messung
ΔK vor der Kalibrierung	0,13 s	8,7 %
ΔK nach der Kalibrierung	0,09 s	6 %

Am Balkon ergibt sich für die Nachhallzeit nach der Kalibrierung ein ΔK von 0,09 s. Dies entspricht einer prozentuellen Abweichung vom Mittelwert der Messung von nur 6%. Obwohl das Modell bereits vor der Feinabstimmung sehr gute Simulationsergebnisse lieferte, konnte mit der Kalibrierung nochmals eine Verbesserung um 2,7% erreicht werden.

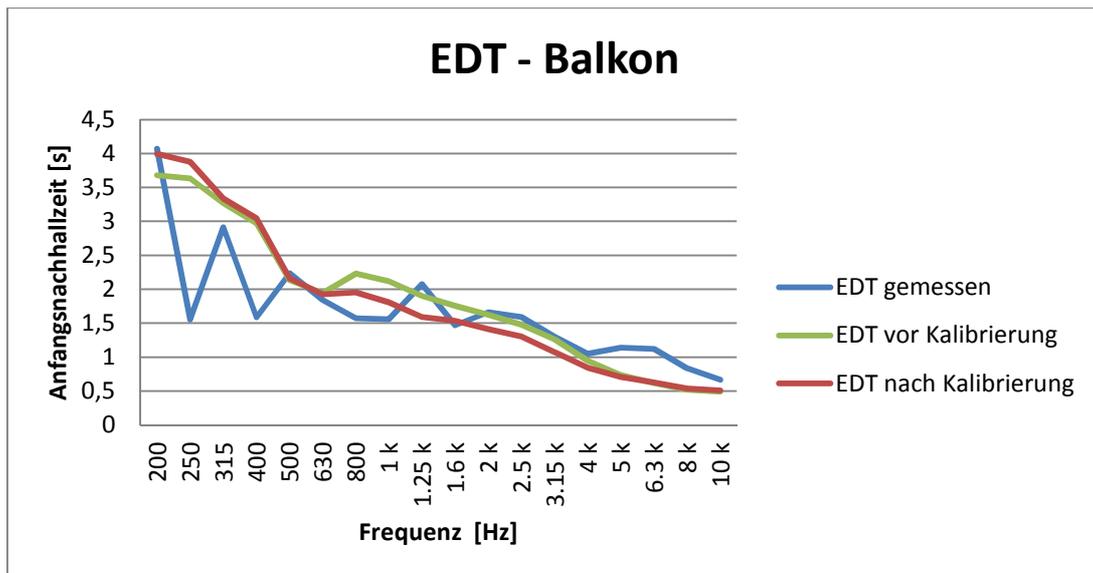


Abb. 4.17: EDT-Vergleich zwischen Messung und Simulation (Balkon; vor und nach der Kalibrierung)

Da die Anfangsnachhallzeit von der Mess- und Quellposition abhängig ist kommt es nicht selten vor, dass durch eventuell auftretende Raummoden der Verlauf der EDT von starken Sprüngen geprägt ist (wie zu sehen bei den Messwerten in Abb. 4.17; Anm.: die für die Auswertung verwendeten Messpositionen lagen dabei unter einem leichten Überhang). Diese extreme Positionsabhängigkeit macht eine Annäherung der Simulation an die gemessene Kurve äußerst schwierig, weshalb auch mit der Kalibrierung nur minimale Verbesserungen erzielt werden konnten. Die starken Schwankungen der Messwerte unterhalb von 500Hz lässt keine subjektive Qualitätseinschätzung bezüglich der Simulationsergebnisse zu. Von 500 bis 1600Hz zeigen die gemessenen Anfangsnachhallzeiten und die simulierten einen im Schnitt ähnlichen Verlauf. Oberhalb von 1,6kHz sind die EDT-Werte nach der Kalibrierung zu gering, was auf eine noch zu große Diffusität in diesen Frequenzbändern zurückzuführen ist.

Tab. 4.7: Kennzahlen ΔK für die EDT - Balkon

		Prozentuelle Abweichung vom absoluten Mittelwert der Messung
ΔK vor der Kalibrierung	0,44 s	26,2 %
ΔK nach der Kalibrierung	0,43 s	25,6 %

Die Simulation der Anfangsnachhallzeit am Balkon zeigt von den ΔK -Werten her ein ähnliches Ergebnis wie im Parkett (vgl. der Tabellen Tab. 4.7 und Tab. 4.4). Auch auf dieser Zuhörerebene täuschen die größeren Abweichungen unter 500Hz ein wenig das Ergebnis (siehe Abb. 4.17). Mit einem ΔK von 0,44s vor und 0,43s nach der Kalibrierung ist die Verbesserung des Modells mit 0,6% sehr gering.

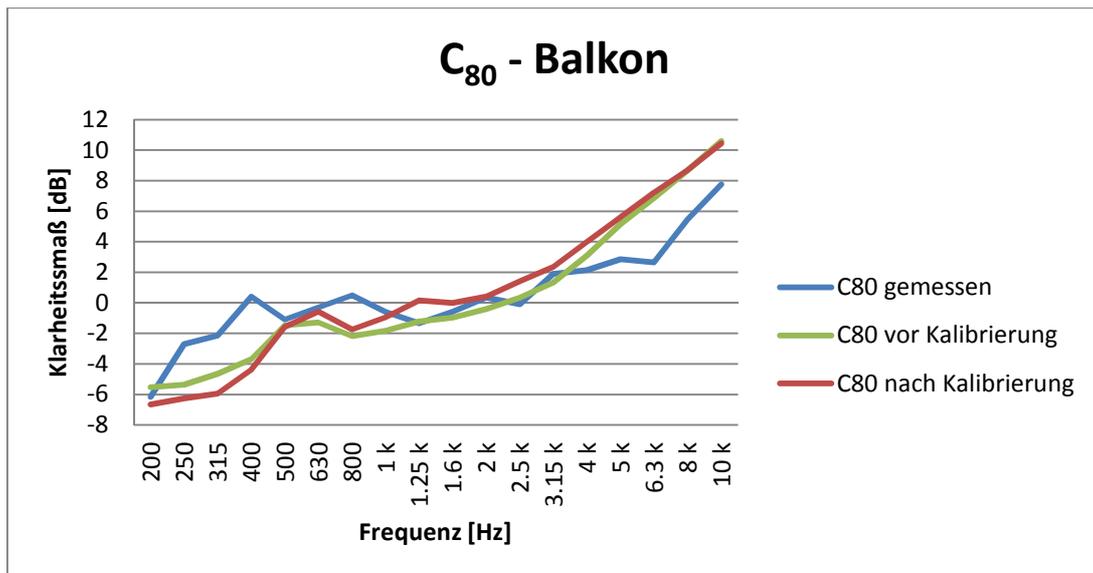


Abb. 4.18: C₈₀-Vergleich zwischen Messung und Simulation (Balkon; vor und nach der Kalibrierung)

Die simulierten C₈₀-Werte am Balkon (Abb. 4.18) liegen vor der Kalibrierung im Bereich von 200 bis 1250Hz unter den Messwerten. Über 3,15kHz ist die Deutlichkeit auf Grund der zu niedrigen EDT-Zeiten (siehe Abb. 4.17) zu groß. Eine gesteigerte diffuse Wirkung der Begrenzungsflächen des Balkons sollte eine Anhebung der EDT und somit die Absenkung des C₈₀ zur Folge haben. In umgekehrter Weise sollte dadurch unter 1,25kHz das Klarheitsmaß begrenzt angehoben werden.

Trotz aller Bemühungen bei der Feinabstimmung des Modells liefert die Simulation nach der Kalibrierung über 3,15kHz noch immer zu hohe Klarheitsmaßwerte, während bei tiefen Frequenzen (< 500Hz) zu geringe Werte feststellbar sind. Eine weitere Verbesserung dieser beiden genannten Defizite würde zu sehr ins Detail der Simulation gehen und brächte in Anbetracht des bereits sehr guten Modells nur geringfügige Verbesserungen.

Tab. 4.8: Kennzahlen ΔK für das C₈₀ - Balkon

		Prozentuelle Abweichung vom absoluten Mittelwert der Messung
ΔK vor der Kalibrierung	1,71 dB	78,8 %
ΔK nach der Kalibrierung	1,93 dB	88,9%

In Tab. 4.8 ist erstmals eine Verschlechterung der Simulationsergebnisse nach der Kalibrierung erkennbar. Das ΔK stieg um 10,1% auf 1,93dB Abweichung. Im Vergleich mit den Klarheitsmaß-Kennzahlen im Parkett (Tab. 4.5) treten am Balkon quantitativ größere Abweichungen auf, die auf Kosten der verbesserten Anpassung bei den Parametern Nachhallzeit und Anfangsnachhallzeit in Kauf genommen wurden.

4.3.3 Simulationsergebnisse Galerie

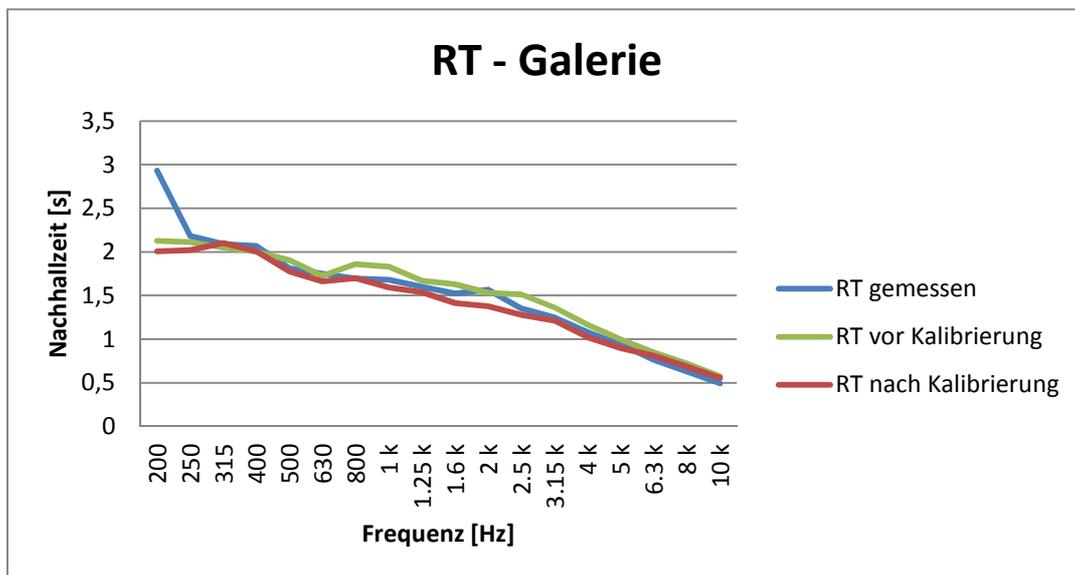


Abb. 4.19: RT-Vergleich zwischen Messung und Simulation (Galerie; vor und nach der Kalibrierung)

Die Simulationsergebnisse der Nachhallzeiten in der Galerie (Abb. 4.19) stimmen bereits vor der Kalibrierung sehr gut mit den tatsächlich im Raum gemessenen Daten überein. Leichte RT-Überhöhungen oberhalb von 630Hz sind feststellbar und sollten mit der den ganzen Saal betreffenden Nachhallzeitabsenkung in diesem Frequenzbereich bereits korrigiert sein.

Nach der Anpassung des Modells an die gemessenen Daten ist die erwünschte Verbesserung deutlich erkennbar. Die simulierten Nachhallzeiten liegen nach der Kalibrierung im Bereich von 500Hz bis 5kHz sogar leicht unter den Messwerten, weisen jedoch im Vergleich zu den Simulationsergebnissen vor der Feinabstimmung einen allgemein geringeren Abstand zur Messkurve auf. Unter 250Hz haben die simulierten Nachhallzeiten auf Grund des programmbedingten Fehlers wenig Aussagekraft.

Tab. 4.9: Kennzahlen ΔK für die RT - Galerie

		Prozentuelle Abweichung vom absoluten Mittelwert der Messung
ΔK vor der Kalibrierung	0,13 s	9,2 %
ΔK nach der Kalibrierung	0,12 s	8,5 %

Nach der Kalibrierung beträgt das ΔK für die Nachhallzeit in der Galerie 0,12s. Die 0,7%-ige Verbesserung ist hauptsächlich auf die gelungene Anpassung oberhalb von 630Hz zurückzuführen (siehe Abb. 4.19). Mit einer prozentuellen Abweichung von unter 10% kann das Modell die in der Galerie vorherrschenden Nachhallzeiten sehr gut simulieren.

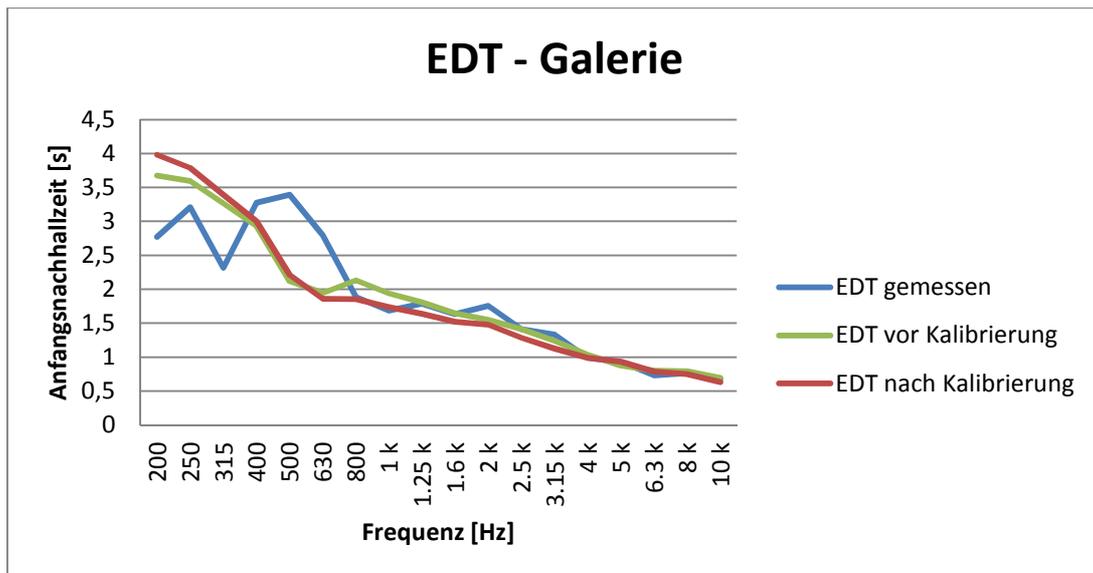


Abb. 4.20: EDT-Vergleich zwischen Messung und Simulation (Galerie; vor und nach der Kalibrierung)

Die Analyse der vom Grundmodell simulierten Anfangsnachhallzeiten in der Galerie (Abb. 4.20) zeigt, dass unter 800Hz größere Abweichungen zu den Messwerten existieren. In den Frequenzbändern 1,25kHz und höher liegen die vor der Kalibrierung nachgebildeten EDT-Zeiten bereits sehr nahe an jenen der Messung und sollten deshalb im Grundmodell wenn möglich nur wenig korrigiert werden.

Wie bereits im Parkett und am Balkon festgestellt, fällt es auch in der Galerie schwer, das Modell an die gemessenen EDT-Werte genauer anzupassen. Die Anfangsnachhallzeit ist nach der Kalibrierung oberhalb von 630Hz leicht gesunken. Ein minimaler Anstieg der Zeiten unter 400Hz ist ebenso ersichtlich, bewirkt jedoch keine genauere Annäherung an die Messwerte. Mit dem vorliegenden Simulationsergebnis ist dennoch eine gute Vorhersage von Anfangsnachhallzeiten – zumindest für den Frequenzbereich über 800Hz – in der Galerie möglich.

Tab. 4.10: Kennzahlen ΔK für die EDT - Galerie

		Prozentuelle Abweichung vom absoluten Mittelwert der Messung
ΔK vor der Kalibrierung	0,37 s	20,0 %
ΔK nach der Kalibrierung	0,41 s	22,2 %

Mit Tab. 4.10 bestätigt sich die Vermutung, dass bei den EDT-Zeiten in der Galerie keine genauere Anpassung durch die Kalibrierung erreicht werden konnte. Die mittlere Abweichung von den Messwerten hat sich um 0,04s minimal verschlechtert.

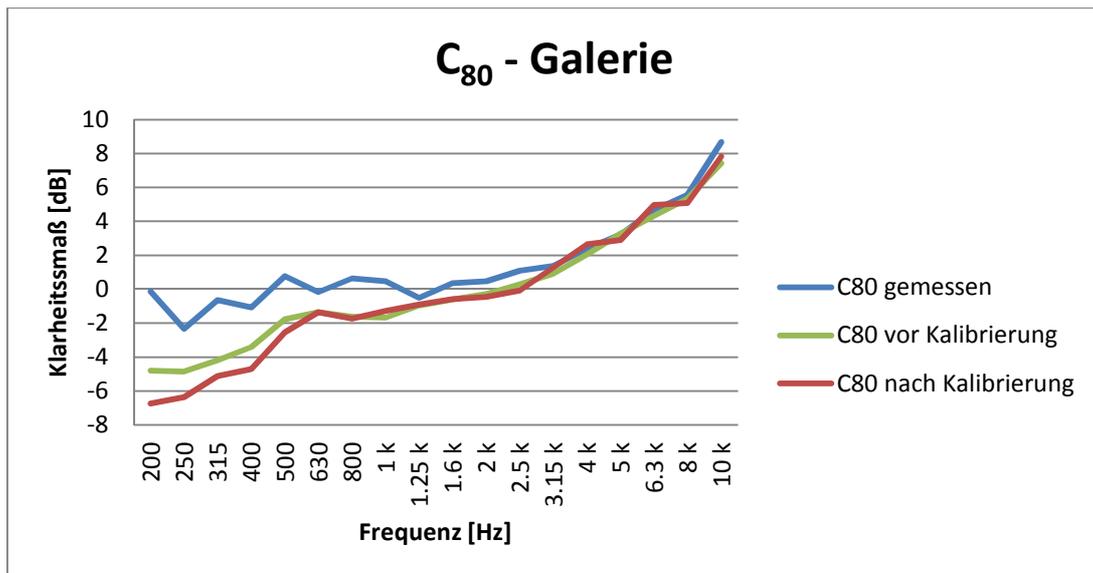


Abb. 4.21: C80-Vergleich zwischen Messung und Simulation (Galerie; vor und nach der Kalibrierung)

Im ganz obersten Zuhörerbereich der Grazer Oper produziert die Simulation vor der Kalibrierung zunehmend zu geringe Klarheitsmaßwerte, je weiter die Frequenz nach unten geht (siehe Abb. 4.21). Als Grund hierfür wurde eine zu geringe Reflexionsenergie (im Bereich bis 80ms nach Eintreffen des Direktschalls) bei tiefen Frequenzen angenommen, die durch Überarbeitung von Rück- und Seitenwandstrukturen in der Galerie eine Verbesserung der Simulationsergebnisse in diesem Zuhörerbereich bringen sollte.

Die nach der Kalibrierung simulierten Klarheitsmaßwerte weisen unter 3,15kHz noch immer deutlich zu geringe Zahlen auf. Durch die komplexe Innenraumarchitektur des nachzubildenden Raumes und mit dem Kompromiss zur Gesamtheit aller Kalibrierungsmaßnahmen konnten hier keine wesentlichen Verbesserungen mit der Feinabstimmung erzielt werden.

Tab. 4.11: Kennzahlen ΔK für das C₈₀ - Galerie

		Prozentuelle Abweichung vom absoluten Mittelwert der Messung
ΔK vor der Kalibrierung	1,49 dB	77,6 %
ΔK nach der Kalibrierung	1,84 dB	95,8%

Ein ΔK nach der Kalibrierung von 1,84dB bedeutet eine Zunahme der Abweichung bei den simulierten Klarheitsmaßwerten um 0,35dB. Von allen ausgewerteten Simulationsparametern zeigt sich beim Klarheitsmaß in der Galerie die größte prozentuelle Abweichung vom absoluten Mittelwert der Messergebnisse, nämlich 95,8%. Die relativ guten Kennzahlen für die RT und die EDT (vgl. Tab. 4.9 und Tab. 4.10) lassen dennoch darauf schließen, dass auch das Schallfeld in der Galerie im Modell gut nachgebildet werden kann.

Zusammenfassung der Kalibrierungsergebnisse und Allgemeine Bewertung des Modells

Speziell für den Parameter Nachhallzeit zeigt die Simulation bei allen Zuhörebeneen einen absolut ähnlichen Verlauf, wie die Messkurven des realen Raumes. Abweichungen zwischen den kalibrierten RT-Simulationsdaten und dem Mittelwert der absoluten Messwerte von unter 10% bestätigen diese Beobachtung. Bei der Anfangsnachhallzeit konnte, bis auf die Galerie, in jedem Publikumsbereich eine Verbesserung der Simulationsergebnisse durch die Kalibrierung erreicht werden. Auffällig ist hierbei, dass sich der EDT-Abgleich zwischen Modell und wahren Raum unter ca. 800Hz als äußerst schwierig herausstellte und die erwünschten Verbesserungen nicht in ihrem gesamten Umfang umgesetzt werden konnten. Eine durchschnittliche Abweichung zu den Messergebnissen von ca. 20% stellt jedoch ein zufriedenstellendes EDT-Simulationsergebnis dar. Fasst man die Ergebnisse des letzten Auswertungsparameters, dem Klarheitsmaß, zusammen so zeigt sich, dass hier von allen drei Gütemaßen die geringsten Werteverbesserungen mit der Feinabstimmung erzielt werden konnten. Besonders unter 1kHz weichen die simulierten Daten oftmals stärker von jenen der Messung ab, wobei im Parkett noch die besten Ergebnisse erzielt wurden. Mit Berücksichtigung der in den Abb. 4.15, Abb. 4.18 und Abb. 4.21 ersichtlichen C_{80} -Abweichungen zwischen Simulation und Messung sind auch mit dem kalibrierten Modell gute Vorhersagen für das Klarheitsmaß möglich.

Allgemeine Bewertung:

Für die Größe und Komplexität dieser Aufführungsstätte lassen die mit der Simulation erzielten Ergebnisse darauf schließen, dass das Modell gut gelungen ist und dass mit ihm valide Vorhersagen in Bezug auf das im Saal auftretende Schallfeld getroffen werden können. Da keine weiteren Messdaten für die akustischen Untersuchungen in der Oper vorhanden sind, stützt sich die im folgenden Kapitel 4.4 weiterführende raumakustische Analyse ausschließlich auf die Ergebnisse des Simulationsmodells und zeigt alle Vorteile einer computerbasierten Akustiksoftware auf. Als wichtiger Bestandteil des unter Kapitel 6 stattfindenden Planungsprozesses kommt das Modell nochmals zum Einsatz, um die Direktschallverteilung von Lautsprechern in der Grazer Oper vorherzusagen.

4.4 Weitere Simulationsergebnisse und Analyse

Neben der allgemeinen Beurteilung der Schalldruckpegelverteilung im Raum, des Echokriteriums, des Seitenschallgrades und des Stärkemaßes werden anhand des Modells auch speziell die Probleme mit den Flatterechos und den Schallfokussierungen (siehe Kapitel 3.4) näher untersucht. Detaillierte Schallfeldabbildungen auf die Zuhörerflächen sollen dabei als Basis für die Analyse dienen.

4.4.1 Schalldruckpegelverteilung (TotalSPL)

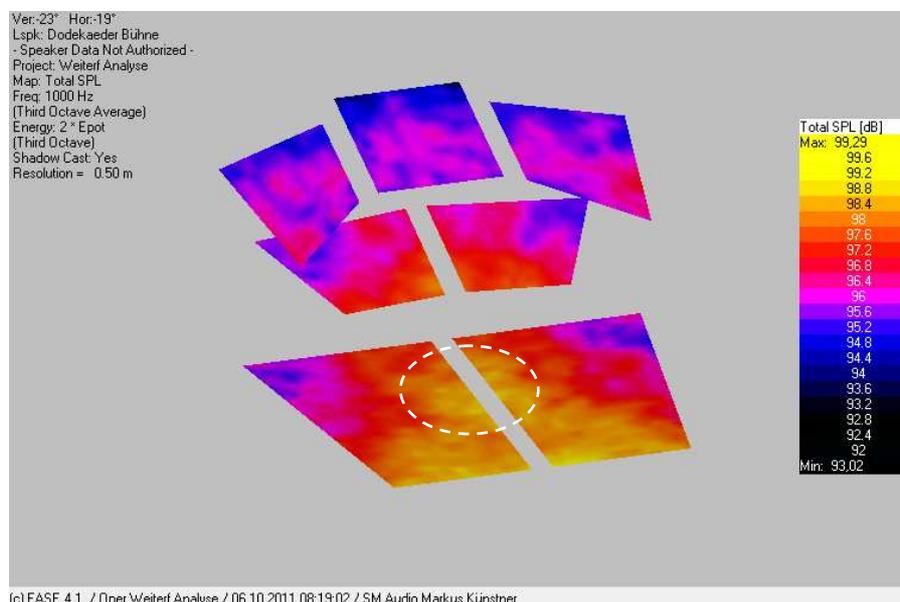


Abb. 4.22: TSPL-Verteilung bei 1kHz (leerer Saal; Quelle auf der Bühne (QPB))

Allgemeine Beurteilung der Schalldruckpegelverteilung/Schalldruckpegelabnahme

In Abb. 4.22 ist die räumliche Verteilung des „Total Sound Pressure Level“ (Summe aus Direktschall und Reflexionsschall) bei 1kHz zu sehen. Die virtuelle, omnidirektionale Schallquelle befand sich bei dieser Simulation mittig auf der Bühne in 1,3m Höhe (eine genaue Beschreibung aller bei der weiterführenden Analyse verwendeten Quellpositionen befindet sich im Anhang).

Analyse Parkett:

Durch die Nähe der Schallquelle zu den ersten Zuhörerreihen werden hier naturgemäß die höchsten Schalldruckpegelwerte erreicht (99,29dB). Der entfernungsbedingte Abfall des Direktschallpegels wird vor allem in der Mitte des Parketts (weißer Ring) durch frühe Reflexionen über die gewölbte Decke kompensiert. Im sowohl linken, als auch rechten

Randbereich sind geringere Pegelwerte erkennbar, die auf Grund von fehlenden Seiten- und Deckenreflexionen (durch die gewölbte Ausbildung der Decke wird vermehrt Schall in die Mitte des Saals reflektiert) entstehen. Vor allem in den hinteren Eckbereichen – die bereits unter dem Balkonüberhang liegen – sinken die Werte stärker ab. Für die Schalldruckpegelabnahme im Parkett ergibt sich zwischen der ersten Reihe Mitte und den beiden weniger guten, hinteren Eckbereichen ein ΔL von ca. -4dB (ΔL -Werte von maximal -5dB sind erlaubt -> siehe Kapitel 2.2).

Analyse Balkon:

Am Balkon sind im vorderen Teil der Hörerflächen noch die Ausläufer des Direktschalls bzw. der ersten Deckenreflexionen erkennbar (max. 98dB). Betrachtet man den tief unter der Galerie sitzenden hinteren Teil dieser Hörerzone so wird deutlich, dass hier durch Abschattung weniger Reflexionen von der Decke eintreffen und sich folglich ein geringerer Schalldruckpegel ausbreitet. Im linken und rechten hinteren Seiten- bzw. Eckbereich sind die Zonen mit den geringsten Pegelwerten zu finden (95dB). Zwischen der vordersten Sitzreihe und den am weitesten hinten liegenden Plätzen im Eck zeigt sich eine maximale Schalldruckpegelabnahme von -3dB.

Analyse Galerie:

Im obersten Publikumsbereich der Grazer Oper zeigen sich in Summe weniger hohe Schalldruckpegelwerte – bedingt durch den weiteren Abstand zur Bühne – als auf den darunterliegenden Ebenen. Pegelunterschiede, innerhalb der Galerie, von unter 2dB deuten darauf hin, dass hier das Diffussschallfeld gegenüber dem Direktschallfeld dominiert und somit eine gleichmäßige Übertragung der Bühnensignale zu den Hörern gewährleistet ist. Ein maximales ΔL von ca. -2,5dB bestätigt den Gesamteindruck, dass in der Galerie eine sehr homogene Verteilung des Schalldrucks vorherrscht.

Genauere Untersuchungen zu den Fokussierungsproblemen

In Kapitel 3.4 wurde als bekanntes akustisches Problem in der Oper das Vorhandensein von Schallfokussierungen in ungefähr der Mitte des Parketts angesprochen. Unter Verwendung des Simulationsmodells soll nun untersucht werden, ob diese unerwünschten Schallbündelungen auch im Modell sichtbar werden und ob dafür mögliche Entstehungsursachen ausfindig gemacht werden können. Zur Auswertung der genaueren Untersuchungen sind in Abb. 4.23 bis Abb. 4.25 die Schalldruckpegelverteilungen bei 630Hz, für unterschiedliche Quellpositionen im Orchestergraben (Positionsangaben zu den Quellen siehe Anhang), zu sehen.

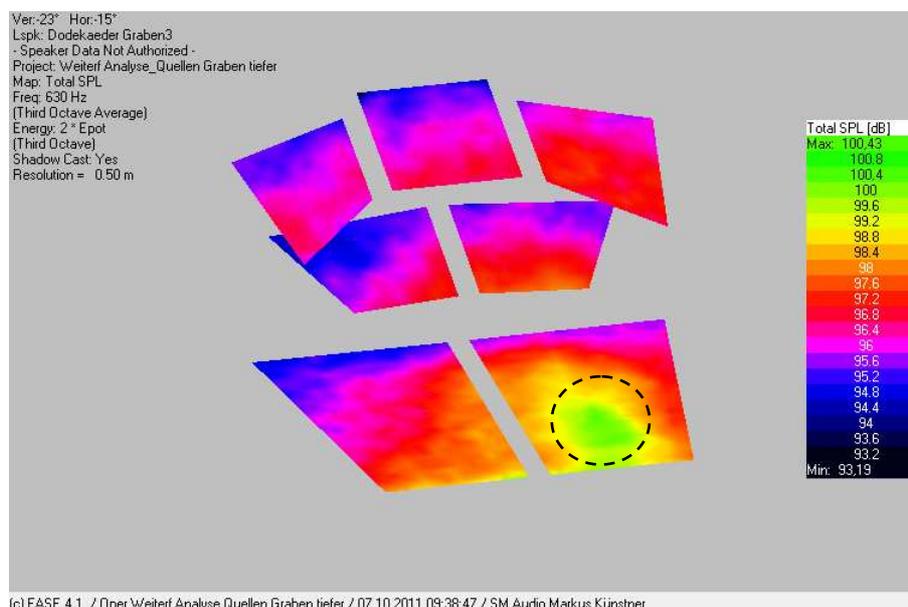


Abb. 4.23: TSPL-Verteilung bei 630Hz (leerer Saal; Quelle im Graben rechts (QP3))

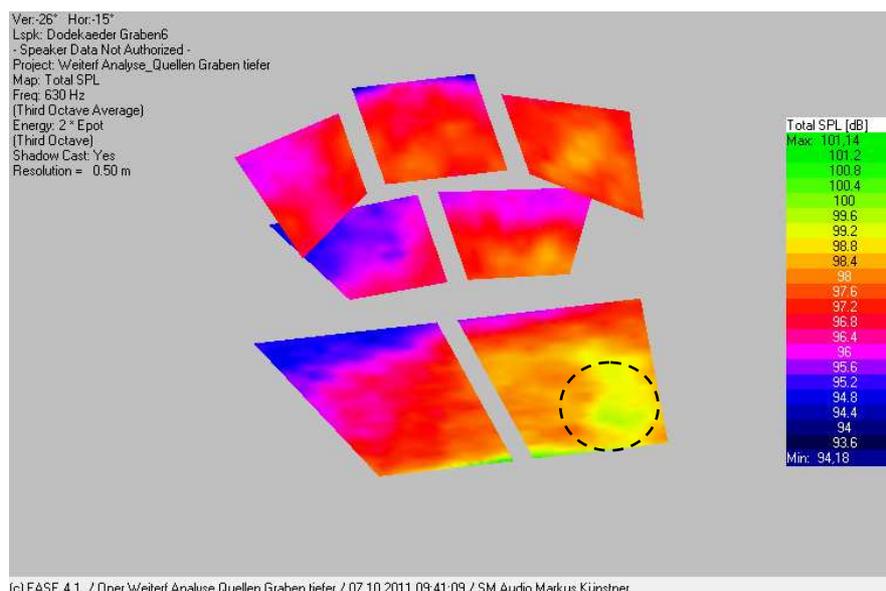


Abb. 4.24: TSPL-Verteilung bei 630Hz (leerer Saal; Quelle im Graben rechts (QP6))

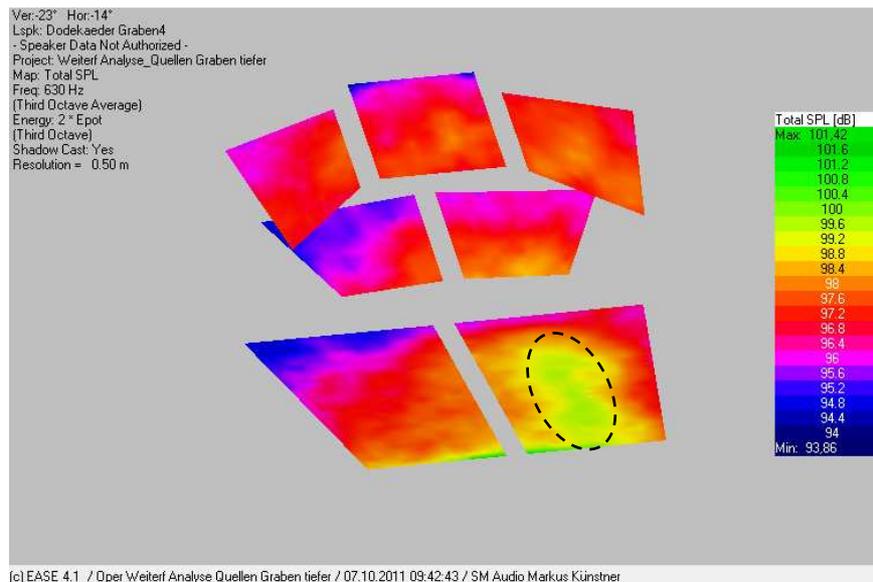


Abb. 4.25: TSPL-Verteilung bei 630Hz (leerer Saal; Quelle im Graben rechts (QP4))

Bei allen drei Pegelverteilungen (Abb. 4.23 bis Abb. 4.25) sind Bereiche erkennbar (schwarze Kreise), in denen es zu einer leichten Überhöhung des Schalldruckes kommt. Auffällig ist hierbei, dass sich diese Zonen spiegelverkehrt zu den Positionen der Schallquellen im Orchestergraben bewegen (sind die Quellen im rechten Orchestergraben positioniert – wie in den obigen Beispielen –, kommt es im linken Parkettbereich zur Entstehung dieser Inseln und umgekehrt). Pegelunterschiede von ca. 3 bis maximal 4dB zwischen den Inseln und der unmittelbaren Umgebung bestätigen leider nicht, dass sich diese Gebiete erhöhten Schalldruckes auf Grund von Schallfokussierungen ausgebildet haben, da dafür der maximale Pegelunterschied zu gering ist. Trotzdem konnte im Simulationsmodell der Grazer Oper gezeigt werden, dass bereichsmäßig konzentrierte Schalldruckzonen vorhanden sind. Zur genaueren Abklärung dieses Problems müssten eine Vielzahl von raumakustischen Messungen in den betroffenen Gebieten durchgeführt und ausgewertet werden.

4.4.2 Echo-Kriterium (Echo Speech/Echo Music)

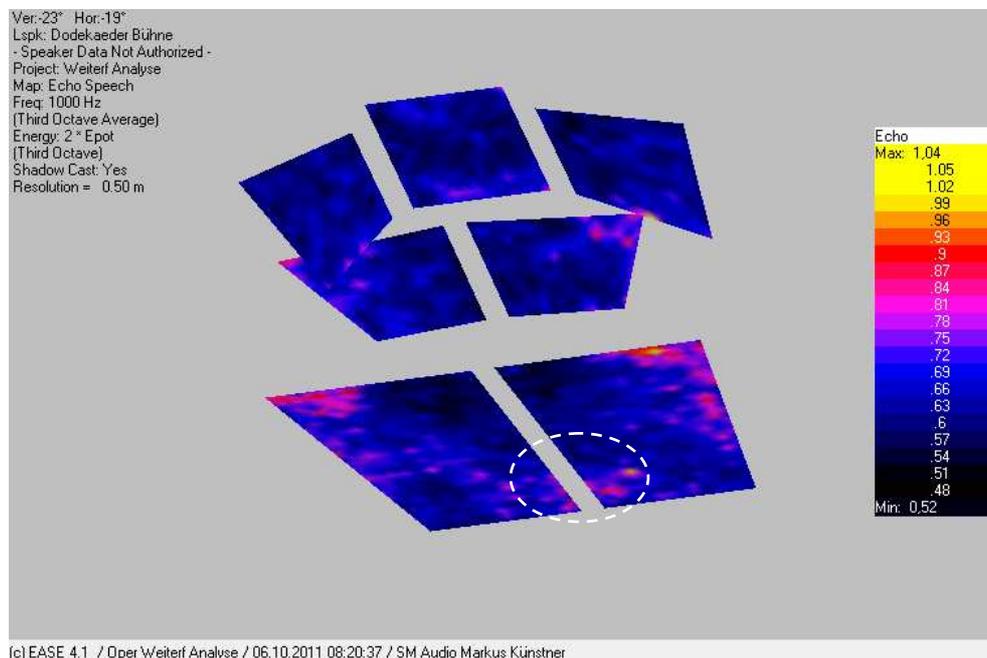


Abb. 4.26: Echokriterium für Sprache bei 1kHz (leerer Saal; Quelle auf der Bühne (QPB))

Allgemeine Beurteilung des Echokriteriums

Abb. 4.26 zeigt das simulierte Echo-Kriterium für Sprachsignale bei 1kHz (Besetzungszustand: leer; Quellposition: QPB). Für die allgemeine Beurteilung des Saals wurde nur das Echo Speech verwendet, da für Opernhäuser – in Gegensatz zu Konzerthäusern – die Sprachübertragung der SängerInnen eine gewisse Priorität hat.

Analyse Parkett:

Bereits bei der allgemeinen Analyse des Saals (Abb. 4.26) sind im Parkett Bereiche erkennbar, die ein erhöhtes Potential zur Ausbildung von Echos aufweisen ($EK_{\text{Sprache}} > 0,9$). Die im vorderen Teil des Mittelgangs sichtbaren höheren Echowerte (weiß eingekreist) bestätigen die unter Kapitel 3.4 erwähnte Hörerfahrung, dass in diesem Bereich störende Reflexionen über die Decke zu kommen scheinen. Die beiden Gebiete in der linken und rechten hinteren Ecke werden im Zuge der genaueren Untersuchung zum Problem mit den Flatterechos (im Anschluss an die allgemeine Beurteilung des Echokriteriums) weiter beobachtet.

Analyse Balkon:

Die räumliche Verteilung der Echowerte am Balkon zeigt nur wenige Auffälligkeiten. Mäßig erhöhte, eingegrenzte Zonen in den hinteren Eckbereichen (EK_{Sprache} von ca. 0,8 bis 0,9) werden in den genaueren Untersuchungen ebenfalls weiter beobachtet. Großteils vorherrschende EK_{Sprache} -Werte von unter 0,7 bestätigen, dass am restlichen Balkon ausreichende Echofreiheit gewährleistet ist.

Analyse Galerie:

In den ersten Reihen der Galerief Flächen sind punktuelle, minimal höhere Werte feststellbar. Da diese jedoch die Echogrenze für Sprachsignale ($EK_{\text{Sprache/Grenze}} = 0,9$) nicht übersteigen, sind auch dort akustisch bemerkbare Störungen im Schallfeld auszuschließen. Alle übrigen Bereiche in der Galerie zeigen eine für Opernhäuser durchaus normale Verteilung des Echo-Kriteriums.

Genauere Untersuchungen zu den Flatterechos

Die bei der Analyse des Parketts herausgefundenen Gebiete mit erhöhter Echoanfälligkeit sollen in diesem Abschnitt genauer untersucht werden. Ein spezielles Augenmerk liegt dabei auf der Analyse der Flatterechos im Bereich des Mittelganges. Vorabuntersuchungen haben gezeigt, dass bei Positionierung der Quelle im vorderen Teil des Mittelganges die Ausprägung der Echos besonders stark ist. Abb. 4.27 zeigt das Echokriterium für Sprache bei 630Hz mit der Quelle im Mittelgang und bei leerem Besetzungszustand.

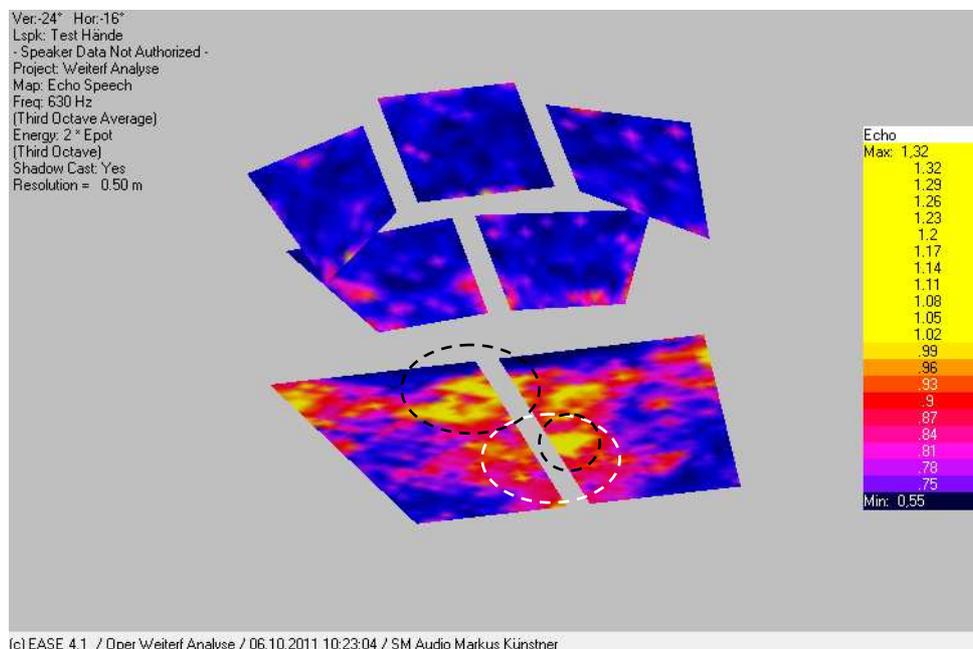


Abb. 4.27: Echokriterium für Sprache bei 630Hz (leerer Saal; Quelle im Mittelgang (QTH))

Um bestätigen zu können, ob es sich bei den Echos im zu untersuchenden Bereich (weißer Kreis) um Flatterechos handelt, muss der zeitliche Verlauf des Echokriteriums an einigen Testpositionen näher analysiert werden. Abb. 4.28 und Abb. 4.29 zeigen Proben zweier Zuhörerplätze aus jener Zone, in der die größten Echowerte auftreten (kleiner schwarzer Kreis).

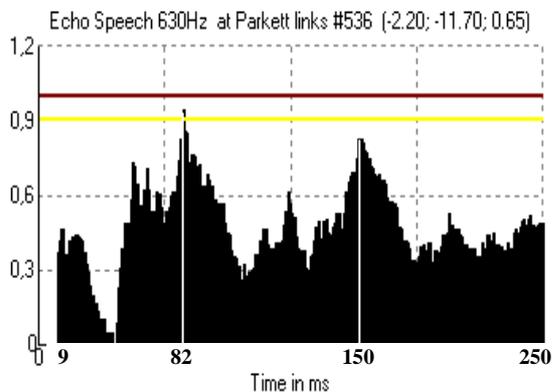


Abb. 4.28: EK_{Sprache} Testposition #536

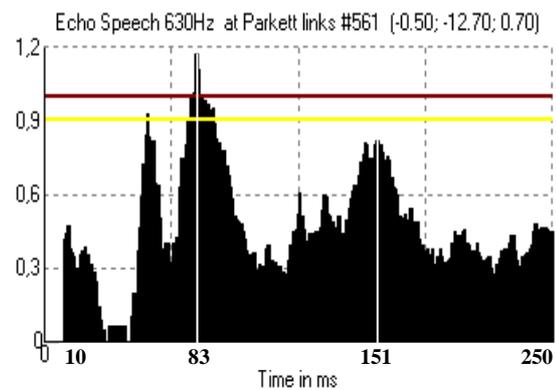


Abb. 4.29: EK_{Sprache} Testposition #561

Anhand des zeitlichen Verlaufs beider Echokriterien (Abb. 4.28 und Abb. 4.29) kann festgestellt werden, dass sehr starke Reflexionen mit einer Periodizität von ungefähr 70ms an den Testorten eintreffen (ab einer Periodizität von 50ms ist bei Sprachsignalen ein Flatterecho wahrnehmbar; siehe auch Seite 18). Tab. 4.12 listet die Eintreffzeitpunkte des Direktschalls sowie jene der Echosignale für beide Testpositionen auf.

Tab. 4.12: Eintreffzeitpunkte der Flatterechos

Testposition	Direktschall	1.Echo	2.Echo
#536	9ms	82ms	150ms
#561	10ms	83ms	151ms

Obwohl in der Simulation das 2.Echo nicht ganz die Echogrenze für Sprachsignale erreicht, so ist dennoch mit einer starken Beeinträchtigung des Schallfeldes zu rechnen. Die Suche nach jener Fläche/jenen Flächen, die für das zu starke zurückwerfen des Schalls verantwortlich sind ergab, dass die relativ hohe Decke der Grazer Oper ein Grund sein könnte. Mit einer Deckenhöhe von ungefähr 12m muss der Schall für eine „annähernd schallharte“ Reflexion einen Weg von ca. 24m zurücklegen. Rechnet man diesen Weg in jene Zeit um, die der Luftschall bei einer Temperatur von 20°C für diese Strecke benötigt (343,46m/s bei 20°C), so kommt man auf einen Wert von rund 70,6ms. Diese Tatsache deckt sich sehr gut mit den in Abb. 4.28 und 4.29 gezeigten Echogrammen.

Die Untersuchung des in Abb. 4.27 zusätzlich auffälligen Bereichs im hinteren Drittel des Parketts (großer schwarzer Kreis) ergab, dass auch hier ebenso starke Deckenreflexionen für eine Überschreitung der Sprach-Echogrenze verantwortlich sind. Anzeichen für die

Ausbildung von Flatterechos konnten in dieser Zone jedoch nicht gefunden werden. Die bei der allgemeinen Echoanalyse des Parketts noch angesprochenen hinteren beiden Eckbereiche zeigten bei den genaueren Untersuchungen keine weiteren Auffälligkeiten.

4.4.3 Seitenschallgrad (LF)

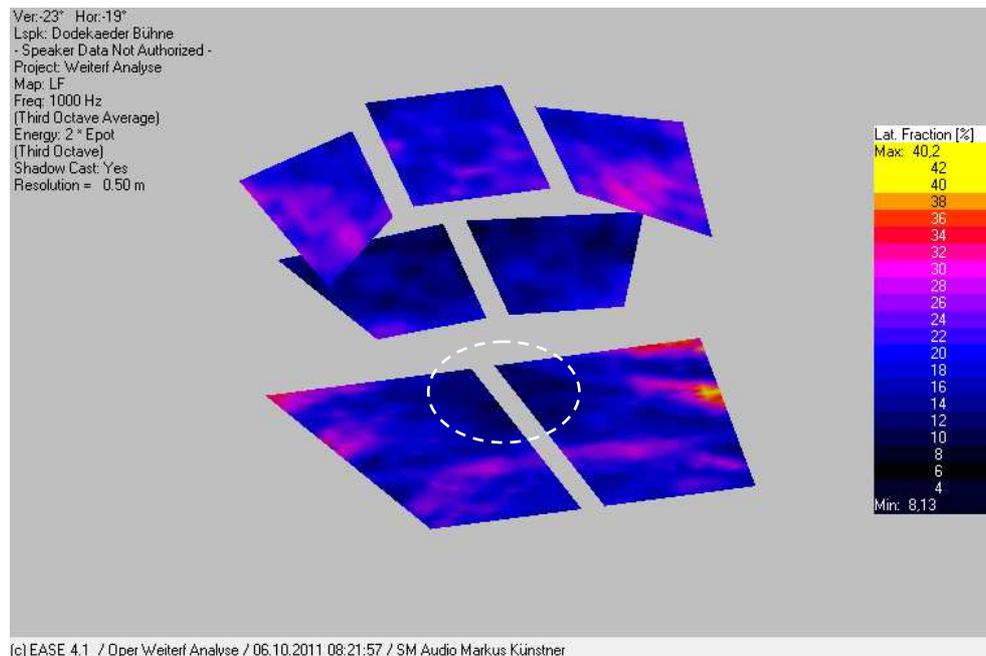


Abb. 4.30: Seitenschallgrad bei 1kHz (leerer Saal; Quelle auf der Bühne (QPB))

Allgemeine Beurteilung des Seitenschallgrades

Für die Bewertung der Räumlichkeit eines Saales steht in der Simulation der Parameter Seitenschallgrad (LF) zur Verfügung. In Abb. 4.30 ist die LF-Verteilung bei 1kHz dargestellt (leerer Saal; Quellposition: QPB).

Analyse Parkett:

Mit Werten zwischen 10% und 40% ist die Verteilung des Seitenschallgrades im Parkett sehr inhomogen. Ein gutes Räumlichkeitsempfinden ($LF > 15\%$ → siehe auch Kapitel 2.2) wird in der vorderen Hälfte des Publikumsbereich, sowie in den nach Hinten verlaufenden Seitenbereichen erzielt. Durch den größeren seitlichen Abstand zwischen dem hinteren Teil des Parketts und den Seitenwänden kommt in der Mitte der Zuhörerfläche zu wenig frühe, seitliche Reflexionsenergie an. Dieses bauakustische Problem äußert sich in einer größeren Zone mit geringeren Seitenschallgraden (weißer Kreis).

Analyse Balkon:

Von allen drei Zuhörerebenen sind am Balkon die geringsten Seitenschallgrade erkennbar (LF-Werte von durchschnittlich 10% bis 15%). Ein Grund dafür sind die dort schräg nach außen laufenden Seitenwände, die durch ihre Lage keinen Direktschall zurückwerfen können und daraus eine mangelnde Versorgung des Hörerbereichs mit seitlichen Reflexionen resultiert. Einzig im vorderen linken und rechten Eckbereich gibt es Plätze mit LF-Werten > 20%, die durch noch rechtzeitig (unter 80ms) eintreffende Seitenreflexionen der angrenzenden Logenfassaden entstehen.

Analyse Galerie:

Auf ca. 2/3 des linken und rechten Galeriebereichs findet man flächenmäßig die größten, zusammenhängenden Bereiche mit hervorragendem Räumlichkeitseindruck (LF > 20%), während in den hinteren, zur Mitte hin gerichteten Eckzonen die Werte auf stellenweise 15% abnehmen. In der „Galerie Mitte“ sind überwiegend Seitenschallgrade von 15% bis 25% feststellbar, die laut Beranek [BER S.470] als akustisch „gut“ bewertet werden können.

4.4.4 Stärkemaß (G)

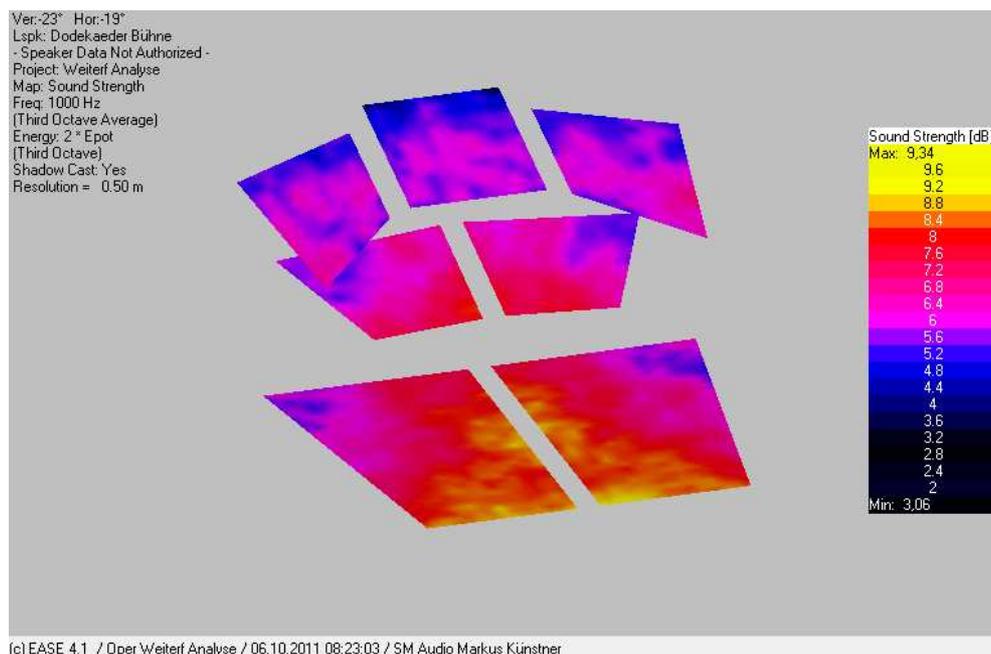


Abb. 4.31: Stärkemaß bei 1kHz (leerer Saal; Quelle auf der Bühne (QP))

Allgemeine Beurteilung des Stärkemaßes

Die Lautstärke bzw. die Lautheit an bestimmten Zuhörerpositionen wird anhand des simulierten Stärkemaßes bei 1kHz (Abb. 4.30) – für einen leeren Saal und mit der Schallquelle auf der Bühne (QP) – untersucht.

Analyse Parkett:

In den vordersten Reihen des Parketts ist mit der größten Energiedichte im Raum zu rechnen, da dort der Direktschalleinfluss der Schallquelle am meisten Wirkung zeigt. Die an dieser Stelle klar erkennbaren größten Stärkemaßwerte von 9dB bestätigen diese Behauptung und kennzeichnen diesen Bereich als einen mit hohem Laustärkeindruck. Fehlende Reflexionsenergie im Bereich der linken und rechten hinteren Ecke des Parketts (diese Bereiche befinden sich bereits unter dem Balkonüberhang => Abschattung von Reflexionen) führt dort zu einer Abnahme des Stärkemaßpegels um ca. 4dB. Ein über das gesamte Parkett gemitteltes $G_{\text{mid_Parkett}}$ von 8,2dB ist im Vergleich mit den optimalen Werten nach Beranek (siehe Kapitel 2.2) etwas zu hoch, liegt aber dennoch innerhalb des Gültigkeitsbereichs für eine optimale Akustik gemäß Fasold.

Analyse Balkon:

Ähnlich dem Bild der Schalldruckpegelverteilung (Abb. 4.22) kann auch hier im vorderen Mittelbereich der Balkonflächen eine Zone ausgemacht werden, die vom Direktschall bzw. von frühen Reflexionen noch beeinflusst wird und in der ein höheres Lautheitsempfinden vorherrscht. Im restlichen Bereich dieser Zuhörerebene ist das Stärkemaß relativ gleichverteilt und zeigt durchschnittliche Werte von ca. 6,5dB. Nach der Bildung des Mittelwerts über die Publikumsfläche „Balkon“ ergibt sich ein $G_{\text{mid_Balkon}} = 7,5\text{dB}$.

Analyse Galerie:

Im gesamten Bereich der Galerie kann eine sehr homogene Verteilung des Stärkemaßes festgestellt werden. Die Entfernung zur Bühne und die Geometrie des Saales führen dazu, dass auf dieser Zuhörerebene – im Vergleich zu den anderen – die geringsten Werte zu finden sind ($G_{\text{mid_Galerie}} = 6,8\text{dB}$). Trotzdem wäre ein noch geringeres Stärkemaß wünschenswert, da G_{mid} -Werte von 2,5dB bis 4dB bei Opernhäusern als optimal angesehen werden (siehe Seite 30).

Bewertung des Bassanteiles im Saal

Mit der Differenz zwischen $G_{\text{low_Saal}}$ und $G_{\text{mid_Saal}}$ kann überprüft werden, ob eine ausreichende Bassstärke im Raum vorhanden ist. In Tab. 4.13 sind die über die Frequenzen 125Hz und 250Hz, sowie 500Hz und 1000Hz gemittelten Stärkemaße und deren Differenz dargestellt.

Tab. 4.13: Stärkemaßwerte zur Beurteilung des Bassanteiles im Saal

Stärkemaßwerte im Saal	
$G_{\text{low_Saal}}$	12,03 dB
$G_{\text{mid_Saal}}$	7,53 dB
Differenz ΔG	4,5 dB

Das positive Ergebnis von ΔG weist darauf hin, dass in der Oper der Bassanteil im Raumklang sehr präsent ist und dass dadurch die Zuhörer einen vollen starken Bass wahrnehmen werden.

4.5 Vergleich der Simulationsdaten mit anderen Häusern

Nachdem die in der Oper gemessenen Parameter Nachhallzeit, Anfangsnachhallzeit und Klarheitsmaß bereits anderen Häusern gegenübergestellt wurden (siehe Kapitel 3.3), werden in diesem Abschnitt die aus dem Simulationsmodell erhaltenen Daten, Stärkemaß und Seitenschallgrad verglichen. In Analogie zum ersten Teil der Gegenüberstellung stammt der Großteil der in Tab. 4.14 zu sehenden Werte – bis auf die Daten für das Große Haus des Staatstheaters Mainz – aus dem Buch Beranek's [BER S.553,593ff]. Insgesamt stehen 9 Opernhäuser und 2 Konzertsäle mit sehr guter Akustik zum Vergleich.

Tab. 4.14: Messdaten bekannter Opern-/Konzerthäuser

Opernhaus/Konzerthaus	Sitzplätze	Volumen in m ³	G _{mid} unbesetzt	LF _{E4} ²³ unbesetzt
(1)Costa Mesa, Segerstrom Hall	2994	27800 m ³	4,4 dB	23%
(2)London, Royal Opera House	2120	12250 m ³	1,2 dB	24%
(3)Mainz, Großes Haus	829	6900 m ³	-	21%
(4)Milan, Teatro Alla Scala	2289	11252 m ³	-2,0 dB	-
(5)Paris, Opéra Bastille	2700	21000 m ³	2,0 dB	-
(7)Paris, Opéra Garnier	2131	10000 m ³	1,2 dB	-
(8)Philadelphia, Academy of Music	2827	15100 m ³	2,0 dB	16%
(9)Salzburg, Festspielhaus	2158	14020 m ³	4,0 dB	16%
(10)Vienna, Gr. Musikvereinsaal (K)	1680	15000 m ³	7,0 dB	17%
(11)Vienna, Staatsoper	1709	10665 m ³	2,2 dB	-
(12)Worcester, Mechanics Hall (K)	1343	10760 m ³	5,6 dB	22%
Durchschnittswerte (11 Häuser)	2071	14068 m³	2,76 dB	20%
(6)Graz, Grazer Oper	1386	7730 m ³	7,53 dB*	20%*

(K).....Konzertsaal

*.....Mittelwert über alle Zuhörerflächen der Grazer Oper

²³ Gemittelter Seitenschallgrad über die Frequenzen 125Hz, 250Hz, 500Hz und 1000Hz; unbesetzter Zustand

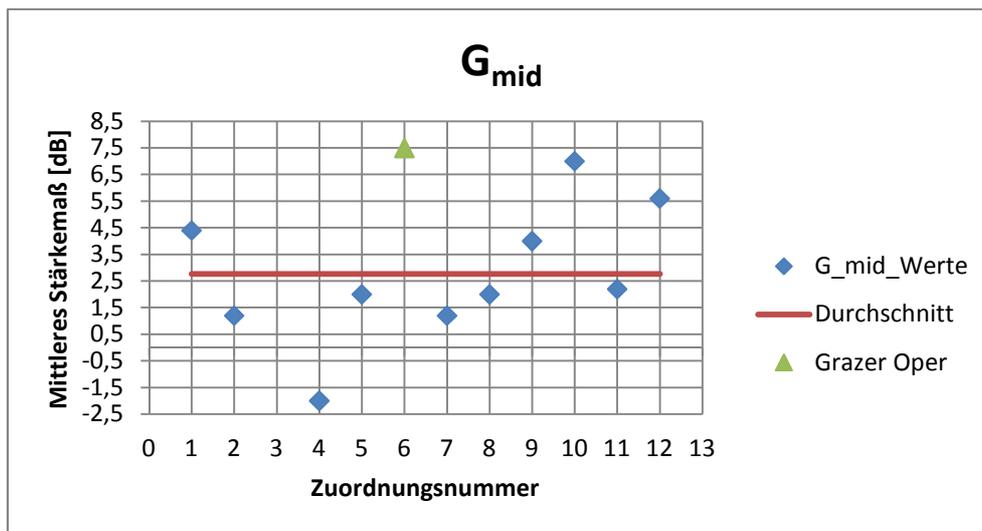
Mittleres Stärkemaß**Abb. 4.32:** Vergleich der Simulationsdaten - Stärkemaß

Abb. 4.32 zeigt das über die Frequenzen 500 und 1000Hz gemittelte Stärkemaß aller in Tab. 4.14 vorkommenden Konzert- und Opernhäuser. Die namentliche Zuteilung der Messwerte erfolgt wieder anhand der Zuordnungsnummern (siehe auch Kapitel 3.3). Es ist deutlich zu erkennen, dass in der Grazer Oper, von den zu vergleichenden Häusern, der größte Lautstärkeindruck vorherrscht. Ein höherer G_{mid} -Wert bedeutet für die Oper, dass ein und dieselbe Aufführung beim Zuhörer als lauter und weniger verständlich bzw. klar wahrgenommen wird, als es in den anderen Häusern der Fall wäre. Ähnlich hohe Stärkemaßwerte wie in der Oper weisen nur die beiden Konzerthäuser, nämlich der Große Musikvereinssaal in Wien(10) und die Mechanics Hall in Worcester(12) auf, die auf Grund ihrer guten Akustik sowohl für Sprach- als auch Musikwiedergabe in diesen Vergleich mit aufgenommen wurden. Betrachtet man nur die Stärkemaße der Opernhäuser, so besitzt die Grazer Oper im Vergleich dazu einen um ca.5dB höheren Wert.

Mittlerer Seitenschallgrad

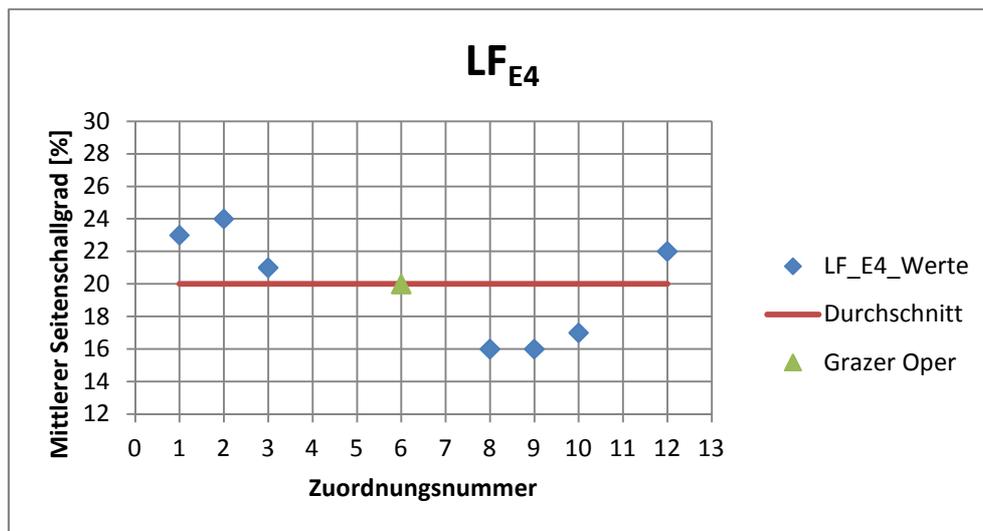


Abb. 4.33: Vergleich der Simulationsdaten - Seitenschallgrad

Aus Abb. 4.33 ist zu entnehmen, dass alle zum Vergleich herangezogenen Spielstätten zumindest eine gute Räumlichkeit ($LF > 15\%$) aufweisen. Die Segerstrom Hall in Costa Mesa(1), das Royal Opera House in London(2), das Große Haus des Staatstheaters in Mainz(3) und die Mechanics Hall in Worcester(12) besitzen LF_{E4} -Werte von über 20%, wodurch in diesen Häusern sogar ein als hervorragend bewerteter akustischer Raumeindruck erreicht wird. Mit einem simulierten Seitenschallgrad von 20% liegt die Grazer Oper exakt am Durchschnittswert, welcher in diesem Beispiel zufällig die Grenze zwischen guter und sehr guter Räumlichkeit darstellt.

4.6 Zusammenfassung der raumakustischen Analyse

Aus der sehr umfangreichen Ansammlung von akustischen Analysedaten sollen hier nochmals die wichtigsten Ergebnisse aus Kapitel 3 und 4 zusammengefasst werden.

Die Nachhallzeit der Oper bei mittleren Frequenzen (RT_{mid}) beträgt 1,4s im besetzten Zustand und befindet sich somit im idealen Bereich für Sprachwiedergaben und Operndarbietungen. Im Vergleich mit anderen Opernhäusern liegt dieser Wert knapp unter dem Durchschnitt. Bei Aufführung von Konzerten oder sinfonische Stücken wäre eine um ca. 0,5s größere RT_{mid} wünschenswert. Die durchwegs homogene RT -Verteilung über alle Zuhörerebenen unterstützt den durch die Nachhallzeit bedingten Klangcharakter des Saals, der als warm mit neutral klingendem Mittenbild und etwas vermindertem Höhenglanz eingestuft werden kann.

Die Auswertung der Anfangsnachhallzeiten ergab, dass die EDT_{mid} mit 1,86s ebenfalls sehr nahe an der optimalen Vorgabe für Opernhäuser liegt. In Analogie zur Nachhallzeit wäre auch hier eine Anhebung um 0,5s erforderlich, sollte die Nutzungsbandbreite der Oper in Richtung

Konzertsaal erhöht werden. Der EDT_{mid} -Wert liegt mit 1,86s über dem Durchschnittswert vergleichbarer Häuser. Bei der Klassifizierung von Sitzplatzbereichen stellte sich heraus, dass am Balkon die besten Zuhörerplätze vorhanden sind.

Das mittlere Klarheitsmaß der Oper ist zu anderen Spielstätten hin vergleichsweise gering. Während für Opern und Sprechgesang der gemessene C_{80mid} -Wert von 0,68dB als sehr gut bewertet werden kann, führt derselbe Wert bei Konzerten dazu, dass die Musik als zu klar bzw. durchsichtig wahrgenommen wird und die Verschmelzung der einzelnen Instrumente und Töne vermisst wird. Auf Grund der frequenzmäßigen Verteilung des Klarheitsmaßes ist mit einer gut tragenden Klangdurchmischung bis ca. 500Hz zu rechnen. Darüber sind positive C_{80} -Werte dafür verantwortlich, dass in diesen Frequenzen die Durchsichtigkeit rasch zunimmt.

Die Analyse des Schalldruckpegels zeigte eine über allen Zuhörerebenen zu erwartende normale Verteilung. Die größte Schalldruckpegelabnahme ΔL kann hierbei im Parkett mit maximal -4dB festgestellt werden. Am Balkon und in der Galerie ergeben sich ΔL -Werte von -3dB bzw. -2,5dB. Genauere Untersuchungen zu den in Kapitel 3.4 genannten Fokussierungsproblemen ließen leichte Pegelüberhöhungen in der Mitte des linken und rechten Parketts erkennen. Diese konnten aber nicht dezidiert als Schallpegelfokussierungen bestätigt werden.

Auf ca. 95% der gesamten Publikumsfläche der Oper bleibt das Echokriterium für Sprache unter der Hörgrenze. Kleinere Bereiche im vorderen Teil des Parketts und in dessen linken und rechter hinteren Ecke zeigten Auffälligkeiten, die zusammen mit den ebenfalls in Kapitel 3.4 erwähnten Flatterechos gemeinsam untersucht wurden. Die Analyse des zeitlichen Verlaufs einiger Echogramme bestätigte, dass in der Oper Zonen, wo Flatterechos auftreten, existieren.

Zur Bewertung des Räumlichkeitseindruckes diene der Seitenschallgrad. Dessen inhomogenste Verteilung zeigte sich dabei im Parkett, wo LF-Werte zwischen 10% und 40% vorhanden sind. Während am Balkon Seitenschallgrade von 10% bis 15% auf ein zu wenig an frühen seitlichen Reflexionen hinweisen, garantieren in der Galerie LF-Werte $> 20\%$ einen ausgezeichneten Räumlichkeitseindruck. Ein über allen Hörerflächen gemittelter Seitenschallgrad von 20% trifft genau den beim Vergleich von bekannten Opernhäusern errechneten Durchschnittswert.

Der letzte Parameter, der bei der raumakustischen Analyse der Grazer Oper untersucht wurde ist das Stärkemaß. Von allen in Tab. 4.14 genannten Aufführungsstätten herrscht in der Grazer Oper das höchste mittlere Stärkemaß ($G_{mid_Saal} = 7,5dB$). Die für Opernhäuser als ideal empfundenen G_{mid} -Werte werden dabei von allen Zuhörerbereichen um ca. 3dB bis 4dB überschritten, liegen aber dennoch innerhalb des Toleranzbereiches. Ein voller starker Bassklang wird sich in der Oper ausbreiten können, da die Differenzbildung zwischen G_{low_Saal} und G_{mid_Saal} ein positives Ergebnis liefert.

Für die in Kapitel 3.4 genannten und in der Analyse teilweise bestätigten Schwächen in der Akustik der Grazer Oper soll nun ein elektroakustisches Konzept zur Verbesserung der Defizite geplant werden. Bevor jedoch dieses Konzept vorgestellt wird, gibt Kapitel 5 einen Überblick über die Funktionsweise jenes elektroakustischen Systems, auf dessen Grundlage sich die Entwicklung der Verbesserungsmaßnahmen stützt.

5 LARES

Wie bereits in der Einleitung beschrieben, soll im 2. Teil dieser Arbeit ein elektroakustisches System zur Verbesserung der akustischen Situation im Zuhörerbereich der Grazer Oper und damit einhergehend auch zur Verlängerung der Nachhallzeiten geplant werden. Da es zum besseren Verständnis des unter Kapitel 6 folgenden Planungsprozesses beiträgt, wird an dieser Stelle das Raumakustiksystem LARES im Detail vorgestellt.

5.1 Grundlagen

Der Aufgabenbereich moderner elektroakustischer Systeme hat sich in den letzten Jahren deutlich vergrößert. Neben der klassischen akustischen Verstärkung können zusätzlich z.B. Raumklangeffekte erzeugt, akustische Defizite ohne architektonische Veränderungen ausgeglichen, oder Adaptierungen im Zusammenspiel mit der musikalischen Darbietung getroffen werden. Jener Faktor, der bei fast allen Systemen die Leistungsgrenze bestimmt, ist die akustische Rückkopplung, dessen Betrag durch den Begriff der mittleren Schleifenverstärkung \bar{g} wie folgt ausgedrückt wird [GRIE1]:

$$\bar{g} = \frac{W_{LS}}{W_Q} \quad (5.1)$$

W_{LS} *gesamte Energie des Lautsprechers, die vom Mikrofon aufgenommen wurde*

W_Q*gesamte Energie der Schallquelle, die vom Mikrofon aufgenommen wurde*

Für ein 1-Kanal Breitbandsystem und eine Nachhallzeit von etwa 2 Sekunden beträgt die maximale mittlere Schleifenverstärkung -12 dB, bevor akustische Rückkopplungen einsetzen. Werden zusätzlich 8dB Sicherheitsreserve zur Vermeidung von Klangverfärbungen dazugegeben, so muss bei einem qualitativ hochwertigen Raumakustiksystem die mittlere Schleifenverstärkung -20dB oder weniger betragen [KRO].

Die durch Rückkopplung auftretenden Klangverfärbungen setzen im Endeffekt fest, wie hoch der größtmögliche Pegel des Systems sein wird. Zur Verringerung dieser Klangfarbenfärbung können folgende Maßnahmen durchgeführt werden [GRIE1]:

- 1) Positionierung des Mikrofons näher zur Quelle
- 2) Reduzierung des Systempegels durch Reduzierung der Systemverstärkung
- 3) Erhöhung der Anzahl unabhängiger Kanäle
- 4) Hinzufügen von Zeitvarianz

Beim LARES-System wurde mit dem zuletzt genannten Ansatz zur Reduktion von Klangverfärbungen ein Konzept entwickelt, bei dem durch spezielle zeitvariante Hallgeräte ein Zufallselement in die Mikrofon-signale eingebracht wird. Die Basis des Systems bilden eine möglichst geringe Anzahl von Mikrofonen (die so nahe wie möglich zur Quelle positioniert werden) und mindestens 4 Lautsprechergruppen. Jede Mikrofon-Lautsprecher Kombination benötigt ein eigenes zeitvariantes Hallgerät. Besteht eine Anlage zum Beispiel aus 2 Mikrofonen und 8 Lautsprecherbänken, so werden insgesamt $2 \cdot 8 = 16$ Hallgeräte benötigt. Zusätzlich muss in jedes dieser Geräte eine unterschiedliche Impulsantwort geladen werden, damit die Ausgangssignale eine möglichst hohe Dekorrelation aufweisen [GRIE1].

5.2 Stabilität

Zur Erhöhung der Stabilität innerhalb eines LARES-Systems besitzen die verwendeten zeitvarianten Hallgeräte folgende Funktionen:

- 1) Durch das Einbringen eines Zufallselements in die Mikrofon-signale verhält sich ein einzelnes Mikrofon im Sinne der Stabilität so, als wäre eine größere Anzahl von unabhängigen Mikrofonen vorhanden. Ein nachträgliches Zusammenmischen der verhaltenen Signale stellt in Punkto Stabilität ebenso kein Problem dar. Das Einsparen von Mikrofonen erlaubt es nun, dass ein System mit z.B. nur zwei Mikrofonen und 8 Lautsprecherbänken sich so verhält, als wären 16 unabhängige Kanäle vorhanden.
- 2) Zeitvariante Hallgeräte besitzen einen Algorithmus, mit dem sie Resonanzen in der Raumübertragungsfunktion verbreitern können. Diese Besonderheit führt dazu, dass die Stabilität innerhalb eines Systems um mindestens 6 dB erhöht wird. Mit einem sehr hohen Grad an Dekorrelation kann die durchschnittliche Schleifenverstärkung in jedem Kanal noch weiter verbessert werden und auf -12 dB ansteigen. Im Vergleich mit nicht zeitvarianten Systemen bedeutet dies eine Verbesserung um + 8 dB.

Werden zusätzlich Mikrofone mit nierenförmiger Richtcharakteristik anstatt Kugelmikrofone verwendet, erhöht sich die Stabilität um weitere + 4,8 dB.

Mit steigender Anzahl der Hallgeräte wird nochmals eine deutliche Stabilitätsverbesserung in der Höhe von $+10 \cdot \log(\text{Anzahl an Hallgeräten})$ dB erzielt.

5.3 Berechnungen zum Entwurf eines LARES-Systems

Die folgenden Gleichungen können als Planungshilfe beim Design von LARES-Systemen herangezogen werden. Ausgehend von der allgemeinen Gleichung für die mittlere Schleifenverstärkung lassen sich folgende Zusammenhänge aufstellen:

$$20 \log \frac{d}{ECD} \leq \bar{g}_{max} \quad (5.2)$$

dAbstand zwischen Mikrofon und Quelle [m]
 ECD^{24} Enhancement Critical Distance [m]

$$20 \log \frac{d}{ECD} \leq -12dB(\text{Stabilität}) - 8dB(\text{Sicherheit}) + 8dB(\text{Zeitvarianz}) \\ + 4.8dB(\text{Nierenmikrofon}) + 10 \log [\text{Anzahl an Hallgeräten } n]$$

dies vereinfacht sich zu

$$\frac{d}{ECD} \leq \frac{\sqrt{\text{Anzahl an Hallgeräten } n}}{2.3} \quad (5.3)$$

Kommen mehrere Mikrofone zum Einsatz, können diese vor dem Hallgerät zusammengemischt werden und Gleichung (5.3) verallgemeinert sich zu:

$$\frac{d}{ECD} \leq \frac{\sqrt{\frac{\text{Anzahl an Hallgeräte } n}{\text{Anzahl an Mikrofonen je Eingang}}}}{2.3} \quad (5.4)$$

Aus Gleichung (5.4) lässt sich schlussendlich die erforderliche Anzahl von Hallgeräten berechnen, sofern der kleinste mögliche Abstand zwischen Mikrofon und Quelle bekannt ist. Auch der umgekehrte Fall ist möglich, wo der maximale Mikrofon-Quelle-Abstand aus der Vorgabe einer fixen Hallgeräteanzahl bestimmt werden kann[GRIE1].

²⁴ ECD....Enhancement Critical Distance; durch EA-Anlage veränderter Hallradius

5.4 Zeitvarianz und dabei auftretende Probleme

Wird in digitalen Systemen irgendeine Form von Zeitvarianz eingeführt, ergeben sich daraus nicht selten größere Probleme. Bei der Quantisierung von zeitvarianten Verzögerungen muss deshalb bei jeder Änderung eine Interpolation durchgeführt werden, da es ansonsten am Ausgang des Systems zu inakzeptablen Rausch- und Klickartefakten kommt. Mit jeder Verzögerungsänderung tritt zusätzlich eine Tonhöhenverschiebung auf. Tritt der Spezialfall ein, dass alle mit Zufallszeiten ausgestatteten Verzögerungen zur gleichen Zeit in die gleiche Richtung verschieben wollen, dann endet dies in starken Klangverfärbungen. Griesinger benutzt hierfür in seinen zeitvarianten Hallgeräten einen speziellen Algorithmus, mit dem die Tonhöhenverschiebungen minimiert werden können [GRIE1].

Andere Untersuchungen zur Zeitvarianz haben noch zwei weitere Nachteile aufgezeigt. Poletti [POL] entdeckte, dass durch Frequenzverschiebungen die Harmonischen der Musiksignale verändert werden und sich dies vor allem bei tiefen Frequenzen bemerkbar macht. Das zweite Problem liegt in der Messbarkeit der Ergebnisse. Messmethoden, die auf Basis der MLS-Korrelationsmethode arbeiten, können zur Beurteilung von zeitvarianten RAK-Systemen nicht herangezogen werden.

5.5 LARES Beispiel – Elgin Theater in Toronto

Als Beispiel für eine LARES Installation sei in diesem Abschnitt das Elgin Theater in Toronto angeführt, in dem als eine der ersten Aufführungsstätten dieses System eingebaut wurde. Bei einem Raumvolumen von insgesamt 97536m^3 haben maximal 1500 Zuhörer Platz. Durch die relativ geringe Deckenhöhe ist die Nachhallzeit – in Anbetracht der Raumgröße – sehr kurz und eine hohe Sprachverständlichkeit stellt sich ein. Am Balkon beträgt die RT bei mittleren Frequenzen und leerem Haus nur ca. 1 Sekunde. Bei 100Hz sind 2,5 Sekunden messbar. Ein großes Problem stellt der Bereich unter dem Balkon dar, da dort beinahe kein Nachhall vorhanden ist [GRIE1].

Vordefinierte Verbesserungsziele:

- Die Seitliche Energie sollte vergrößert werden
- Der Hallpegel und die Nachhallzeit – besonders unter dem Balkon – sollte angehoben werden
- Das System sollte unsichtbar für die Zuhörer sein
- Es sollte keine Klangverfärbungen geben

Umsetzung des Systems:

Insgesamt wurden im Elgin Theater 120 Lautsprecher verbaut, deren Frequenzgang linear ist und deren untere Grenzfrequenz 60Hz beträgt. Die 2 eingesetzten LARES Prozessoren stellen zusammen 8 Ausgänge zur Verfügung, die mit 8 Lautsprechergruppen verbunden sind. Durch die Anordnung der Lautsprecher nach einem bestimmten Muster gelang es, dass benachbarte LS nicht von ein und demselben Ausgangssignal angesteuert werden, wodurch

die Diffusität des Systems gesteigert und die Klangverfärbungen minimiert wurden. Mit den 2 in 15 Metern Entfernung zur Bühne aufgestellten B&K²⁵ Nieren-Mikrofonen wurde das Mischen der beiden Eingangskanäle und die Ansteuerung von 16 unabhängigen zeitvarianten Hallgeräten möglich. Zur Verifizierung des letzten Planungszieles, dass die ECD einen Wert von ca. 7 Meter erreichen sollte, dienten die unter Kapitel 5.3 angeführten Gleichungen.

Berechnungsbeispiel Elgin Theater:

Vorgaben:

$ECD_{\text{erwünscht}} \dots \dots \dots 7\text{m}$

Anzahl an Hallgeräten = 16

Anzahl der Mikrofone je Eingang = 1

Mit Gleichung (5.4) ergibt sich:

$$\frac{d}{7} \leq \frac{\sqrt{\frac{16}{1}}}{2,3}$$

$$d \leq \frac{4 \cdot 7}{2,3}$$

$$d \leq 12,17\text{m}$$

Der Abstand zwischen Mikrofon und Quelle sollte mit den oben genannten Vorgaben maximal 12,17 Meter betragen. Da das Gelände am Balkon des Theaters aber 15m Abstand zur Bühne hat und dort eine beinahe unsichtbare Installation der Mikrofone möglich war, wurden diese im Kompromiss mit der gewünschten ECD dort installiert. Mit der Vergrößerung des Abstandes änderte sich jedoch auch die ECD. Aus der Gleichung (5.4) kann diese neu berechnet werden:

$$\frac{15}{ECD} \leq \frac{\sqrt{\frac{16}{1}}}{2,3}$$

$$\frac{15}{ECD} \leq 1,74$$

²⁵ B&K.....Brüel und Kjaer

$$\frac{15}{1,74} \leq ECD$$

$$8,62m \leq ECD$$

In Anbetracht der besseren Positionierung der Mikrofone – vom visuellen Standpunkt her – wurde eine Vergrößerung der ECD von 7 auf 8,62m akzeptiert. Durch Einsetzen dieses Wertes in die Gleichung für den Hallradius (siehe Gl. (2.3)) kann die durch das System maximal erzielbare Nachhallzeit errechnet werden, unter der noch eine ausreichende Stabilität gewährleistet ist:

$$ECD = 0.057 \cdot \left[\sqrt{\frac{s}{m}} \right] \cdot \sqrt{\frac{V}{RT_{EAK}}}$$

$$8,62 = 0.057 \cdot \sqrt{\frac{97536}{RT_{EAK}}}$$

$$RT_{EAK} = 4,28 s$$

Für das Elgin Theater bedeutet dies in der Praxis, dass z.B. die mittlere gemessene Nachhallzeit von 2 Sekunden mit diesem System um ca. 2,3s verlängert werden könnte.

Ergebnisse:

Die Erwartungen an das System wurden bei weitem übertroffen. Bereits nach den ersten Aufführungen mit eingeschalteter Anlage lobten Kritiker sowie Musiker und Zuhörer die verbesserte Akustik des Saales. Besonders unter dem Balkon konnte die Lautstärke und der Hall deutlich angehoben und eine hervorragende, homogene Schallfeldverteilung erzielt werden. Über dem Balkon wird im Grundsetup dem Klang nur etwas „Wärme“ hinzugefügt, da dort für Sprache und leichte Musik bereits eine gute Akustik vorherrscht. Bei Nutzung des Theaters als Konzertsaal kann jedoch auch in diesem Zuhörerbereich die Nachhallzeit sowie der Hallpegel unabhängig voneinander angehoben werden. Ausgehend von den Systemeinstellungen für symphonische Musik bewertete Griesinger folgende Hallpegel in Toronto für optimal [GRIE1].

Tab. 5.1: Optimale Hallpegel im Elgin Theater in Toronto

Art der Musik	Hallpegel in Bezug zur optimalen Systemeinstellung bei Symphonischer Musik
Symphonische Musik	0dB
Sprache	-6dB
Oper	Werte zwischen 0 und -6dB
Unbegleitetes Singen	+2dB
Begleitetes Singen	+4dB

Weitere Beispiele zu anderen LARES Installationen sind u.a. in [GRIE2] angeführt.

6 Planung eines EA-Systems zur Klangoptimierung

Da das Gebäude der Grazer Oper unter Denkmalschutz steht und somit keine bauakustischen Veränderungen vorgenommen werden dürfen, wird in Kapitel 6 die Planung eines EA-Systems in der Grazer Oper zum Zwecke einer Verbesserung der akustischen Gesamtsituation durchgeführt. Ziele sind dabei die Verminderung der Echo- bzw. Fokussierungseffekte sowie die Verlängerung des frequenzabhängigen Nachhalls. Alle dazu notwendigen Schritte werden erläutert und in einem abschließenden Konzeptplan visuell dargestellt.

6.1 Ideen zur Optimierung des Schallfeldes mittels einer EA-Anlage

Auf Grund von planungstechnischen Einschränkungen, insbesondere bezogen auf

1. die Möglichkeit zur Beschaffung des benötigten Equipments,
2. den Denkmalschutz in der Grazer Oper und
3. die kostengünstige Realisierung einer möglichen Probebeschallung

wird auf Basis der LARES Funktionsweise (siehe Kapitel 5) ein RAK-System geplant, mit dem unter Berücksichtigung der bereits in der Oper installierten Lautsprecher und zusätzlich verwendeter Hardware (z.B. Lexicon 480L Hallgerät, Equalizer, Endstufen, etc.) die unerwünschten Echos und Schallfokussierungen im Parkett verschleiert, sowie das Anheben des Nachhalls und die Verbesserung des Envelopments realisiert werden können. Nachfolgend werden die Ideen beider Verbesserungsmaßnahmen im Detail vorgestellt:

Echos/Schallfokussierungen verringern

Bei der „Verdeckung“ der sowohl empirisch bekannten (Kap. 3.4), als auch bei der akustischen Analyse des Raumes (Kap. 4.4.2) bestätigten Echoeffekte wird durch Zuspielung von künstlichen frühen Reflexionen vor jenem Zeitbereich, wo die ersten Echos auftreten, das „Herausstechen“ dieser Überhöhungen „verschleiert“. Dies wird dadurch möglich, indem die Einhüllende des Nachhalls mit Hinzufügen von zusätzlichen Early Reflections nach oben geht und somit die zu starken, späten Reflexionen unter die Echogrenze fallen, wodurch sie nicht mehr hörbar sind. Mit Abb. 6.1 und Abb. 6.2 wird die Idee zur Verdeckung der Echoeffekte anhand der Raumimpulsantwort nochmals verdeutlicht.

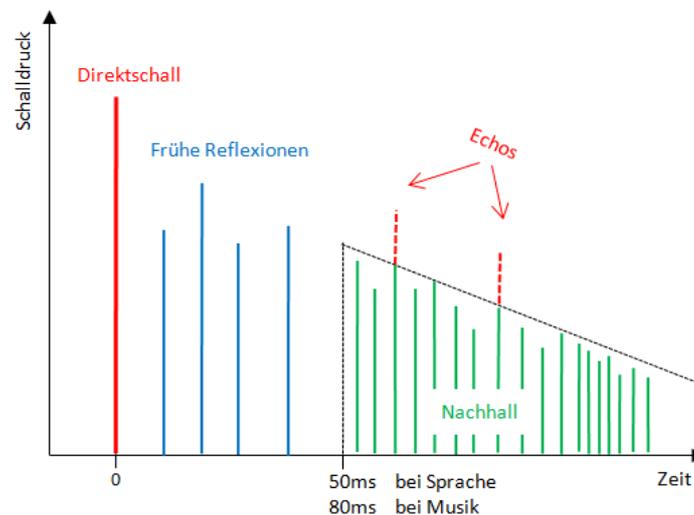


Abb. 6.1: Raumimpulsantwort mit Echo

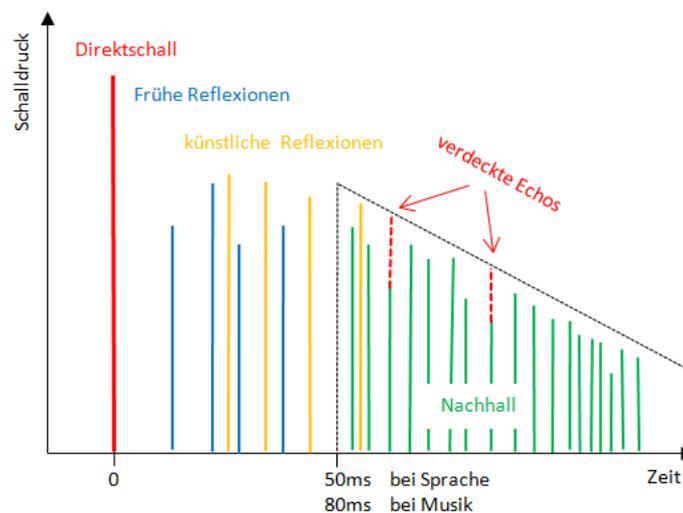


Abb. 6.2: Raumimpulsantwort mit Echo und künstlichen frühen Reflexionen

Bei der Umsetzung dieser elektroakustischen Methode zur Ecoverdeckung muss darauf geachtet werden, dass keine künstlichen Reflexionen im Bereich 0-20ms nach dem Direktschall zugespielt werden, da es sonst zu starken Klangverfärbungen kommt. Des Weiteren gilt: Je häufiger und stärker Reflexionen im Bereich von 50-150ms nach dem Direktschall vorhanden sind, desto undurchsichtiger und verschwommener wird der Klang [GRIE3]. Diese Tatsache führt zu einer Abnahme der Sprachverständlichkeit und zum Verlust von Klarheit und muss bei den Einstellungsparametern innerhalb des Systems beachtet werden. Vorteile bringen zusätzliche frühe Reflexionen in jener Hinsicht, dass sie unter 50ms den Lautstärken- und Räumlichkeitseindruck erhöhen und somit positiv zum Klangeindruck beitragen (siehe Seite 17).

Durch die Maßnahme der künstlichen Generierung von „Early Reflections“ und die damit verbundene Anhebung der frühen Energie und des Nachhalls, werden auch die Schallfokussierungen im Parkett nicht mehr so stark hervortreten und deshalb als weniger störend empfunden werden. Unterstützend dazu wird auch die separate Verlängerung des Nachhalls eine Verbesserung bezüglich dieser Problematik bringen.

Nachhallzeit verlängern bzw. Envelopment verbessern

Die raumakustische Analyse der Nachhallzeiten (Kap. 3.2.1) hat gezeigt, dass in der aktuellen Saalsituation vor allem die zu geringen RT-Werte bei höheren Frequenzen (> 3kHz) einen verminderten Höhenglanz hervorrufen. Für die außernatürliche Verwendung als Konzertsaal sind über dem gesamten Frequenzbereich um ca. 0,5s zu niedrige Nachhallzeiten vorhanden. Seitens der Klangdurchmischung im Saal zeichnen sich die stark positiven Klarheitsmaßwerte über 500Hz dafür verantwortlich, dass die Verschmelzung zu einem Gesamtklang in diesen Frequenzen nicht optimal funktioniert. Unter Bedacht der bereits bei der Ecoverdeckung entstehenden geringfügigen Nachhallanhebung und dem der Spielsituation angepassten Verwendungszweck werden nachstehende Ideen mit dem RAK-System umgesetzt:

Verbesserungsmaßnahmen für Operndarbietungen:

Bei „normaler“ Verwendung als Opernhaus wird nach Einschätzung und Bewertung der durch die Maßnahmen zur Ecoverdeckung veränderten Raumakustik eine leichte Nachhallzeitverlängerung oberhalb von 500Hz die Brillanz des Klages und somit den akustischen Gesamteindruck in der Oper deutlich verbessern. Mit Anhebung der Nachhallzeit und mit der damit verbundenen Abnahme des Klarheitsmaßes wird sich außerdem die Klangdurchmischung im Saal verbessern, jedoch die Verständlichkeit von Sprache und die Durchsichtigkeit von Musik werden in geringem Maße abnehmen.

Bei der Reduzierung der „negativen“ Begleitererscheinungen einer Nachhallzeitanhebung (Sprachverständlichkeit ↓; Klarheit ↓) und bei der Verbesserung des Envelopments spielt auch der Einsetzzeitpunkt des Nachhalls eine wichtige Rolle. Reflexionen, die in einem Bereich von 150-400ms nach Signalende beim Hörer eintreffen, erzeugen ein Diffusschallfeld, das sehr gut hörbar ist und das eine unterstützende Wirkung für den Direktschall bietet. Beim Zuhörer führt dieses Schallfeld ebenso zur Empfindung von Einhüllung, dessen Stärke in erster Linie von der absoluten Lautheit des Nachhalls abhängt und mit dem Schallpegel der gespielten Musik steigt oder sinkt [GRIE2] [GRIE3]. Aus diesen Erkenntnissen heraus ist es im Falle der Grazer Oper von Vorteil, den künstlich zugespielten Nachhall erst mit einer

Verzögerung von mind. 150ms nach dem Direktschall einsetzen zu lassen, wodurch das Empfinden von Einhüllung verstärkt wird und die Verschlechterungen bezüglich der Klarheit und der Sprachverständlichkeit gering gehalten werden können.

In Abbildung 6.3 wird die Idee der künstlichen Anhebung des diffusen Schallfeldes nach 150ms am Beispiel einer Raumimpulsantwort gezeigt.

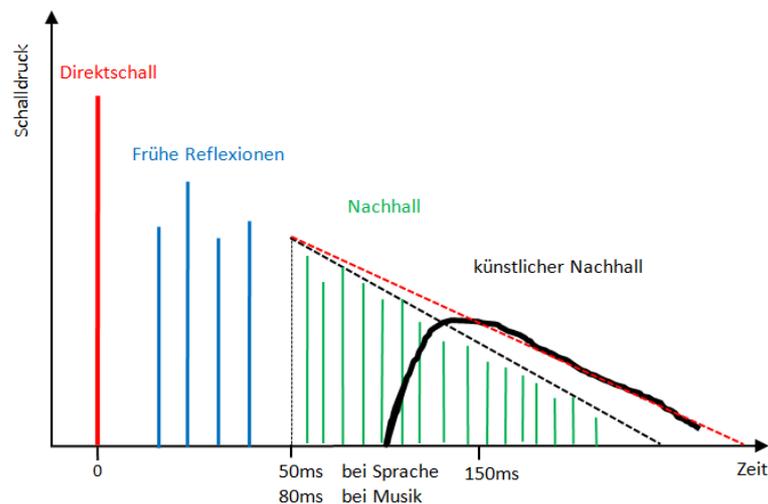


Abb. 6.3: Idee zur elektroakustischen Nachhallverlängerung

Verbesserungsmaßnahmen für Konzerte:

Für die akustische Erweiterung der Oper in Richtung Konzertsaal wird der künstliche Nachhall in allen Frequenzbändern um ca. 0,5 Sekunden (abhängig von den Ergebnissen der Ecoverdeckung!) angehoben. Die Nachhallverlängerung unter 500Hz führt dabei speziell zu einer verbesserten Klangdurchmischung innerhalb des Orchesters, da sich die Grundtöne der meisten Orchesterinstrumente frequenzmäßig in diesem Bereich befinden [GRIE3]. Zum Ausgleich der durch das Absorptionsverhalten der Oper fehlenden Klangbrillanz wird eine leichte Anhebung der RT-Zeiten bei höheren Frequenzen auf die allgemeine Nachhallzeitverlängerung aufgeschlagen. In Analogie zu den Verbesserungsmaßnahmen bei Operndarbietungen erfolgt auch hier die Zuspiegelung des künstlichen Nachhalls erst nach 150ms.

6.2 Dimensionierung der Komponenten

Nach der Vorstellung und Erklärung aller durchzuführenden Optimierungsmaßnahmen (Kap. 6.1) folgt nun die Zusammenstellung, Überprüfung und Berechnung aller am System beteiligten Komponenten.

Da das in der Oper vorhandene technische Equipment in die Planung mit eingebunden werden sollte, musste zuerst überprüft werden, ob und speziell welches Equipment in der Oper

existiert und was davon für die Realisierung des Systems genutzt werden kann. Ein Datenblatt mit der Auflistung der vorhandenen Tontechnik und eine kurze Einweisung bezüglich fix installierter Lautsprecherboxen und Geräte gaben einen Überblick über die aktuelle Situation.

6.2.1 Lautsprecher

Die bereits in der Einleitung auf Seite 9 erwähnten historischen Lautsprecher in den beiden Deckenbögen über dem Orchestergraben und dem Parkett spielen eine wesentliche Rolle bei der Verwirklichung der Installation. Auf Grund des Denkmalschutzes gibt es gewisse Einschränkungen bezüglich zusätzlich zu installierendem Equipments was am Beispiel der Grazer Oper bedeutet, dass der Einbau von additiven Lautsprechern in die Wandstrukturen nicht gestattet ist. Aus diesem Grund und durch den Wunsch nach einem möglichst unauffälligen System, sollen die beinahe nicht sichtbaren historischen Deckenlautsprecher die Basis der Beschallungsanlage bilden. In der Abbildung 6.4 sind beispielhaft 2 der insgesamt 42 Lautsprecher (LS) mit grünen Kreisen heraus gezeichnet.



Abb. 6.4: Foto der Oper mit Kennzeichnung von 2 Deckenlautsprechern

Nachdem die in der Decke eingelassenen LS-Chassis vermutlich aus den 70er Jahren stammen, mussten diese zuerst einer gründlichen Funktionsprüfung unterzogen werden. Vom Typen her handelt es sich in dem vorderen Bogen (über dem Orchestergraben) um Isophon PSL 130/20 Tieftontonslautsprecher. Im hinteren Bogen sind Isophon BPSX Breitbandlautsprecher verbaut. Es stellte sich heraus, dass alle 42 Chassis noch funktionieren und somit verwendet werden konnten. Da ein LARES-System mit mindestens vier voneinander unabhängigen Lautsprecher-Kreisen arbeitet, ist es aus Gründen der weniger komplexen Verkabelung (eine genauere Erklärung dazu siehe Punkt 6.2.1.2) von Vorteil, nur 40 Deckenlautsprecher zu benützen. Um für die Nachhallzeitverlängerung im tieffrequentem

Bereich genügend Schalldruck erzeugen zu können, werden die 2 Stück USW 1 Meyer Sound Subwoofer, die neben dem Kronleuchter in der Decke verbaut sind und zur Front PA gehören, ebenfalls in das System mit eingebunden.

6.2.1.1 Direktschallsimulation der Lautsprecher

Mit Hilfe des Simulationsmodelles aus Kapitel 4 dieser Arbeit kann man sich nun die Direktschallpegelverteilung aller am Konzept beteiligten Lautsprecher genauer ansehen. Hierfür wurden die geplanten Schallwandler, also die 40 Deckenlautsprecher und die 2 Subwoofer, in das Modell eingebaut und so gut wie möglich an der originalgetreuen Position angeordnet (siehe Abb. 6.5). Für die Deckenlautsprecher wurde in der Simulation das Modell „Electro-Voice 309“ gewählt, da die Originalmodelle in der Lautsprecher-Datenbank nicht zur Verfügung standen und die EV's ähnliche Leistungs- sowie Abstrahlparameter aufweisen. Die Meyer Sound Subwoofer waren hingegen in der Datenbank implementiert.

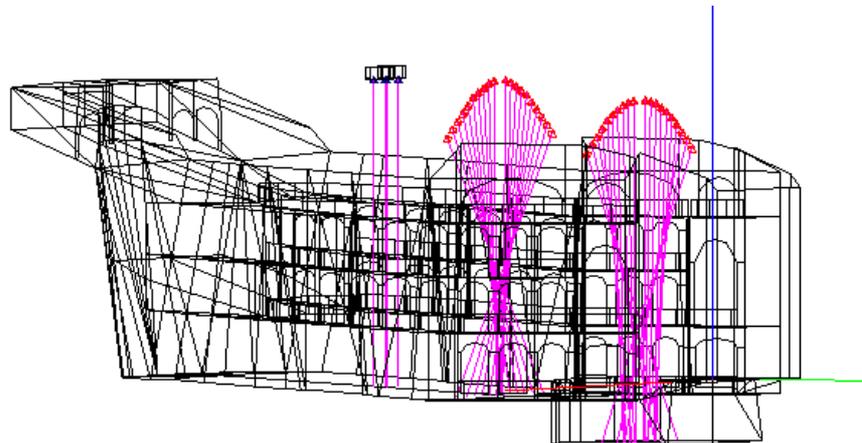


Abb. 6.5: Lautsprecherpositionen im Simulationsmodell

Anhand der DSPL-Simulationsergebnisse wird nun bestimmt, ob die in der Decke eingelassenen Lautsprecher – zusammen mit den beiden Subwoofern – von der Anzahl her ausreichen und ob sie an günstigen Positionen liegen, um bei der Probebeschallung die Sitzplatzbereiche flächendeckend mit Schallenergie versorgen zu können. Die zweite wichtige Erkenntnis, die aus der Direktschallpegelsimulation abgelesen werden kann ist jene, ob genügend Lautsprecher eingeplant wurden bzw. ob die verbauten historischen LS-Chassis stark genug sind, um die in der Grazer Oper benötigte Systemleistung umsetzen zu können.

Erfahrungswerte haben gezeigt, dass ein RAK-System in der Lage sein sollte so viel Schallenergie zu erzeugen, dass im gewünschten Hörerbereich der maximale Schalldruck des Systems nicht mehr als 4dB unter dem Direktschallanteil einer auf der Bühne positionierten Quelle liegt. In kleinen Räumen ist diese Vorgabe nur schwer einzuhalten, da die ersten

Zuhörerreihen meistens sehr nahe an der Bühne angeordnet sind. Als Beispiel: Wenn ein Orchester mit 115dB Direktschallpegel spielt und die ersten Publikumsreihen sind 4 Meter davon entfernt, muss die Anlage abzüglich der 12dB vom Abstandsgesetz (die Amplitude des Schalldrucks nimmt mit zunehmender Entfernung zur Schallquelle mit $1/r$ ab) und dem 3dB Verdeckungsfaktor²⁶ eine Schallenergie von 100dB liefern können. Je weiter entfernt die LS des RAK-Systems von den Zuhörerzonen angeordnet sind, desto schwieriger wird diese Aufgabe. [BAR][GRIE4]

Überträgt man das obige Berechnungsbeispiel auf eine Probebeschallung in der Oper und geht man davon aus, dass für Tests eine Schallquelle mit maximalem Direktschallpegel von ca. 90-100dB verwendet wird, wobei der Abstand zwischen Bühne und ersten Zuhörerreihen in der Oper 6m beträgt, so muss das geplante RAK-System eine Schallenergie von 72-82dB in den vordersten Reihen liefern können.

DSPL-Simulationsergebnisse des geplanten RAK-Systems

Abb. 6.6 zeigt die Simulation des Direktschalldruckpegels (DSPL) bei einer Frequenz von 1000Hz. Auf dem Mapping-Plot in Abb. 6.7 sieht man ebenfalls den „Direct SPL“, hier jedoch bei 250Hz. Bei den hier gezeigten Simulationen wurde die Berechnung auf allen Hörerflächen durchgeführt.

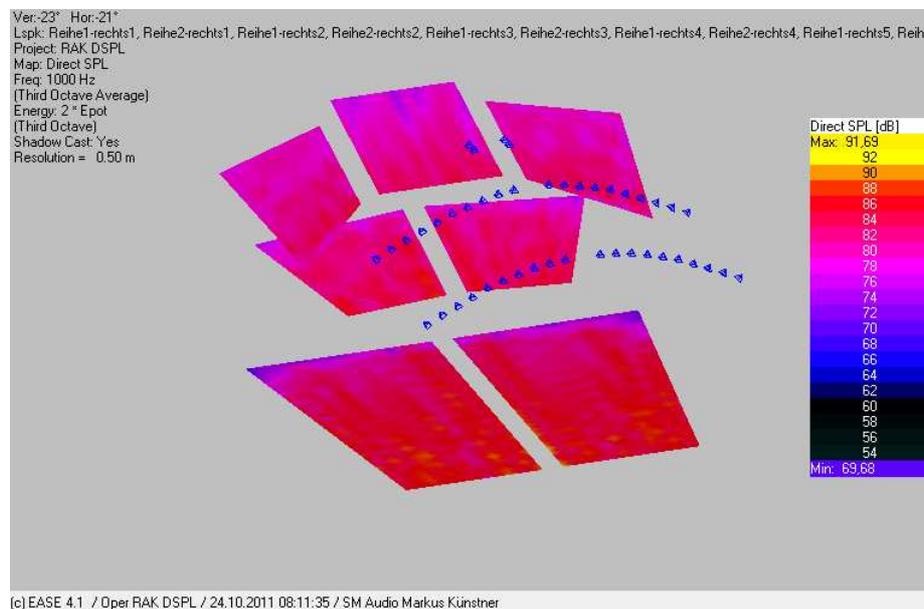


Abb. 6.6: Direktschallpegelverteilung bei 1000Hz (3D-Ansicht)

²⁶ Die Separation von Vorder- und Hintergrundgeräusch benötigt nach plötzlichem Verstummen der Schallquelle einen Pegelsprung von mind. 3dB, um die Maskierung der Notenenden durch den Nachhall auszugleichen. [GRIE4]

Interpretation der Ergebnisse bei 1kHz

Die in Abb. 6.6 gezeigte Verteilung des Direktschallpegels lässt erkennen, dass sowohl im Bereich des Parketts, als auch in der Galerie und am Balkon größtenteils DSPL-Werte von über ca. 80dB erreicht werden. Jene Zonen, in denen die geringsten Pegel ausgemacht werden können, befinden sich entweder unter einem Überhang (hinterer Teil des Parketts) oder liegen unmittelbar neben stark reflektierenden Begrenzungsflächen (Glasscheibenfront des Technikraumes in der Galerie). Die an manchen Stellen zusätzlich erkennbaren Pegelschwankungen lassen sich darauf zurückführen, dass es zu leichten Interferenzen zwischen verschiedenen Lautsprechern in diesem Bereich und bei dieser Frequenz (1kHz) kommt. Da der Absolutbetrag der Pegelunterschiede aber nicht allzu groß ist, kann dieser Umstand für eine Probebeschallung bedenkenlos vernachlässigt werden. Im Allgemeinen werden alle Hörerplätze gut mit Direktschall versorgt und die für das System geplante Anzahl von Lautsprechern und deren Positionierung reicht völlig aus.

Überprüfung der Leistungsvorgabe bei 1kHz:

Obwohl die Deckenlautsprecher in einer Höhe von 12m Höhe angebracht sind, werden die vordersten Reihen im Parkett mit einem Direktschallpegel von ca. 84dB beschallt, womit die für die Testbeschallung benötigte Leistungsvorgabe des Systems (72dB bis 82dB in den ersten Zuhörerreihen), zumindest bei der Frequenz von 1000Hz, klar erreicht wird.

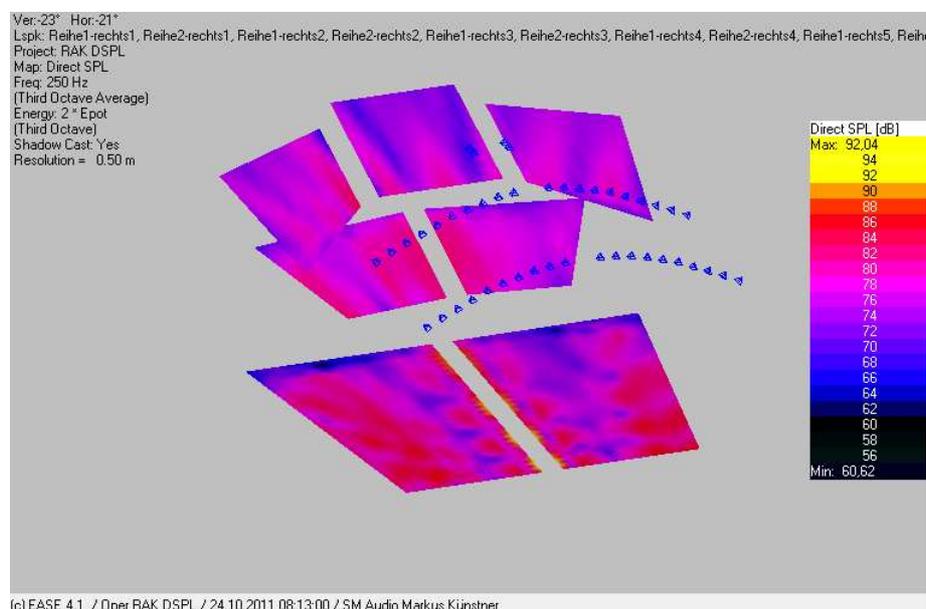


Abb. 6.7: Direktschallpegelverteilung bei 250Hz (3D-Ansicht)

Interpretation der Ergebnisse bei 250Hz

Betrachtet man die Simulationsergebnisse bei einer „tieferen“ Frequenz von 250Hz (Abb. 6.7) so fällt auf, dass die Streuung des Direktschallpegels wesentlich größer ist, als bei 1kHz. Eine Ursache dafür könnte die Anordnung der Deckenlautsprecher sein, aber auch der Punkt, dass für eine gleichmäßige Beschallung einer Fläche mit tieffrequentem Schall viel mehr Leistung benötigt wird, als bei höheren Frequenzen. Da die geplante Anlage aber durch die bereits bestehenden LS Chassis in der Decke leistungsmäßig begrenzt ist und die Ausrichtung der Schallwandler nur minimal anpassbar ist, kann die oben gezeigte Direktschallverteilung bei 250Hz als akzeptabel angesehen werden. Aus planungstechnischer Sicht sind auch nach der Analyse der DSPL-Verteilung bei 250Hz keine zusätzlich zu installierenden Lautsprecher für eine Probebeschallung notwendig, sofern die zur Funktionalität des Systems erforderliche Leistung auch bei tieferen Frequenzen erbracht werden kann (siehe folgende Überprüfung der Leistungsvorgabe).

Überprüfung der Leistungsvorgabe bei 250Hz:

Mit der geplanten Lautsprecheranordnung (40 Deckenlautsprecher und 2 Subwoofer) kann, dem Simulationsmodell nach, in der ersten Zuhörerreihe des Parketts ein Direktschalldruckpegel von mindestens 78dB (bei 250Hz) erzeugt werden. Vergleicht man diesen Pegel mit der Leistungsvorgabe für die Probebeschallung, so liegt dieser genau in der Mitte des Wertebereichs (72-82dB) und erfüllt damit die geforderten Leistungsansprüche an das System.

6.2.1.2 Verkabelung der Deckenlautsprecher

Die 40 Deckenlautsprecher gilt es so verkabeln, dass man insgesamt 4 Gruppen (wegen der für diese Probebeschallung vorhandenen Anzahl von Hallprozessoren, siehe Kap. 6.2.2) hat, wobei die Anordnung bzw. das Zusammenspiel der LS in dem Sinne gewählt werden muss, dass angrenzende Lautsprecher nicht von demselben Ausgang angesteuert werden. Diese Verschachtelung der LS und die damit fehlende Kohärenz zwischen ihnen führen zu einer steigenden Diffusität im System und die Klangverfärbungen können reduziert werden [GRIE1]. Im Falle der Oper bedeutet dies, dass die dem gleichen Kanal zugeordneten Strahler so weit als möglich voneinander entfernt liegen sollten, um die Entkopplung untereinander optimal ausnützen zu können. Abbildung 4.10 zeigt das Einteilungsschema der 4 Deckenlautsprechergruppen in der Oper unter Berücksichtigung der Kohärenzbedingung.

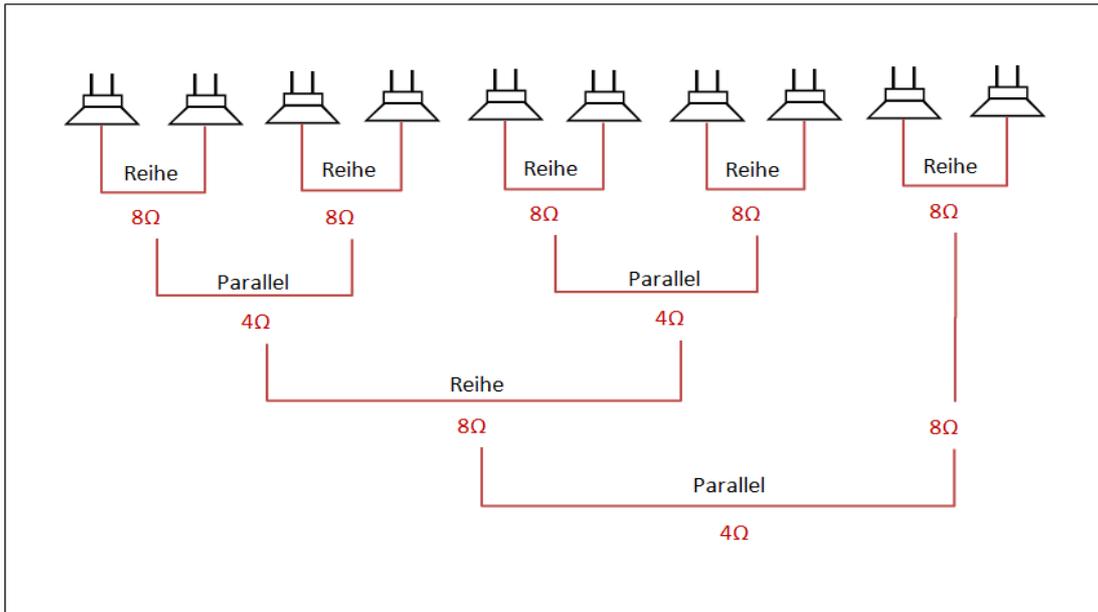


Abb. 6.9: Beispielverdrahtung für einen Kanal

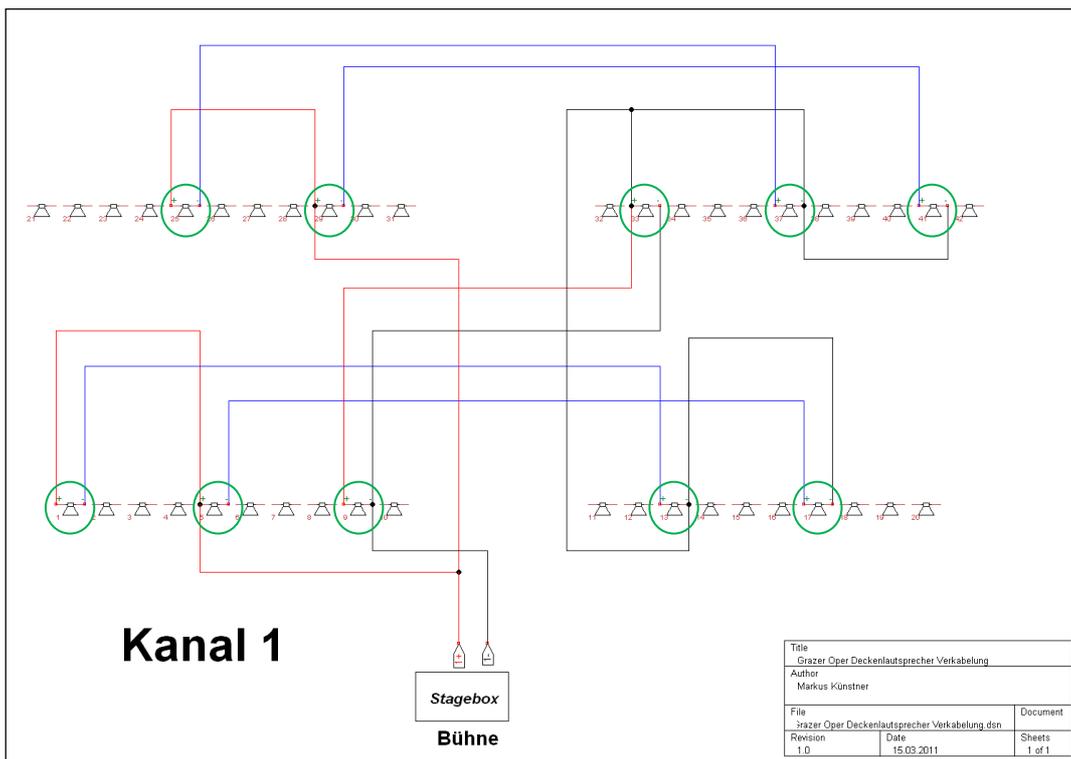


Abb. 6.10: Verkabelungsplan Kanal 1

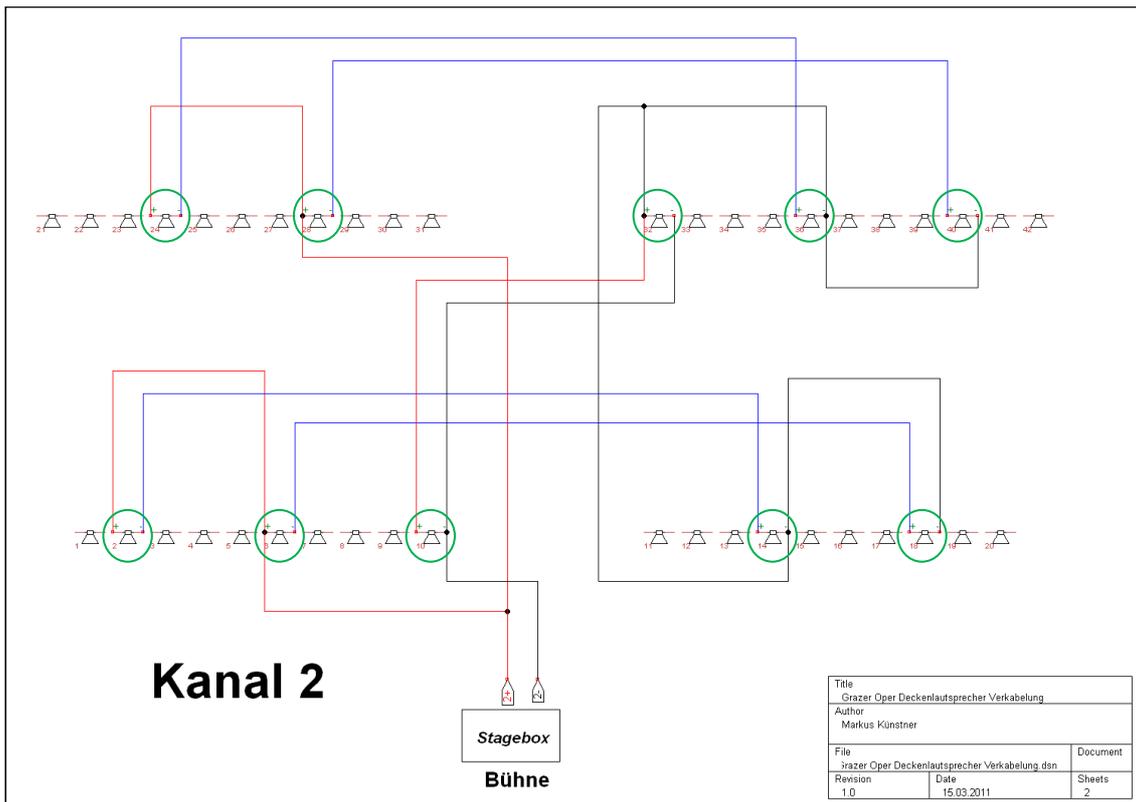


Abb. 6.11: Verkabelungsplan Kanal 2

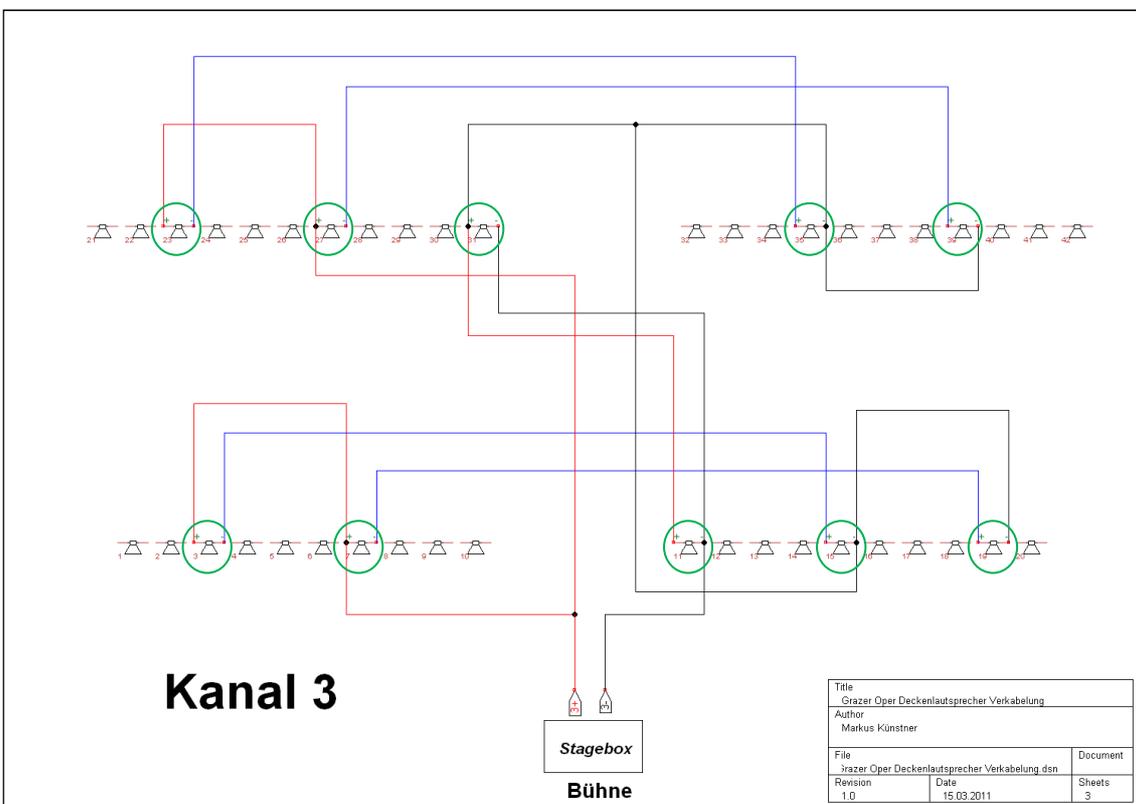


Abb. 6.12: Verkabelungsplan Kanal 3

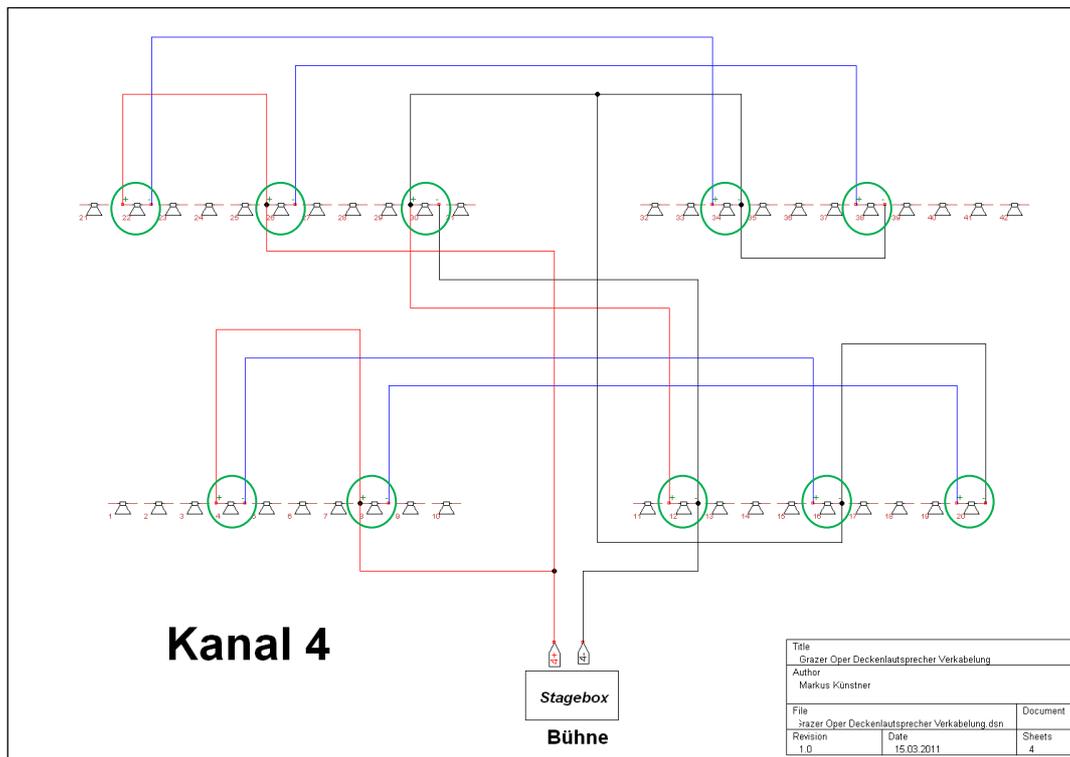


Abb. 6.13: Verkabelungsplan Kanal 4

6.2.2 Maximaler Mikrofonabstand zur Quelle

Bei der Bestimmung des maximalen Abstands zwischen Mikrofon und Quelle spielt der Begriff „Akustische Rückkopplung“ eine wesentliche Rolle. Er ist der bestimmende Faktor, wenn es um die Leistung von elektroakustischen Verbesserungssystemen geht (siehe Kapitel 5). Wie groß die Rückkopplung bei einem RAK-System ist, hängt in erster Linie vom Verhältnis zwischen dem Mikrofon-Quelle-Abstand und dem Hallradius ab. Ein weiteres Kriterium ist die Tatsache, dass die akustische Rückkopplung frequenzmäßig nicht linear ist und die Übertragungsfunktion zwischen Quelle und Mikrofon ebenfalls einen hohen Stellenwert einnimmt. Die dort auftretenden Überhöhungen und Einbrüche müssen in einem ersten Schritt mittels eines Equalizers linear ausgeglichen werden. Die verbleibende feine Struktur von „peaks“ (Spitzen) und „dips“ (Einbrüchen) ist im Endeffekt ausschlaggebend für das Auftreten von Rückkopplungen und führt zu Klangverfärbungen im System, weit bevor die mittlere Schleifenverstärkung die 0dB-Marke erreicht hat [GRIE3]. Griesinger entwickelte bei seinem LARES-System einen speziellen Hallalgorithmus, mit dem er durch Phasenmodulation mit geringer Tonhöhenveränderung die noch vorhandenen Resonanzen in der Raumübertragungsfunktion verbreitern kann (Anm.: Die genauen Algorithmen sind geschützt und konnten im Zuge dieser Arbeit nicht recherchiert werden.). Diese Tatsache führt dazu, dass mit zeitvarianten Hallgeräten die Systemstabilität um mindestens 6dB erhöht werden kann. Im Ganzen gesehen, arbeiten alle diese Punkte im LARES Mainframe zusammen und führen dazu, dass man eine geringe Anzahl von Mikrofonen sehr weit weg

von der Quelle (ca. 10m bei 16 Hallprozessoren) positionieren kann und trotzdem noch ausreichende Stabilität im System hat. Ist der Hallradius bekannt und steht fest, wie viele zeitvariante Hallprozessoren eingesetzt werden, so kann man über Gleichung (5.4) den maximalen Abstand zwischen Mikrofon und Quelle berechnen (siehe auch Kapitel 5.5).

Da für eine mögliche Probebeschallung in der Grazer Oper kein LARES-Mainframe zur Verfügung steht, jedoch das Tonstudio der TU Graz über ein Lexicon 480L Hallgerät verfügt und ein zweites Gerät ausgeliehen werden könnte, wird die Planung mit einem hochwertigen Nierenmikrofon und den 4 zeitvarianten Hallprozessoren aus den beiden Lexicon 480L Effektgeräten durchgeführt.

Berechnungsbeispiel für die Grazer Oper:

Vorgaben:

Anzahl an Hallgeräten = 4

Anzahl der Mikrofone je Eingang = 1

$RT_{EAK} = 2,0$ Sekunden

Zur Bestimmung der ECD in der Oper wird davon ausgegangen, dass die mittlere Nachhallzeit von 1,4s im besetzten Zustand auf ca. 2 Sekunden angehoben werden soll. Aus dieser Annahme heraus ergibt sich mit der Gleichung für den Hallradius (siehe Gl. (2.3)) folgender ECD-Wert:

$$ECD = 0.057 \cdot \sqrt{\frac{V}{RT_{EAK}}} = 0.057 \cdot \sqrt{\frac{7730}{2}} = 3.54m$$

Setzt man nun alle Vorgaben in die Gleichung (5.4) ein, so bekommt man den maximalen Mikrofonabstand zur Quelle, unter welchem das System noch ausreichend stabil läuft.

$$\frac{d}{ECD} \leq \frac{\sqrt{\frac{\text{Anzahl an Hallgeräte } n}{\text{Anzahl an Mikrofonen je Eingang}}}}{2.3}$$

$$\frac{d}{3.54} \leq \frac{\sqrt{\frac{4}{1}}}{2.3}$$

$$d \leq 3.54 \cdot \frac{\sqrt{\frac{4}{1}}}{2.3} = 3.07m$$

Der eigentlich sehr geringe Abstand lässt sich darauf zurückführen, dass erstens der elektroakustisch veränderte Hallradius in der Oper mit 3,07m sehr klein ist (Anm.: natürlicher Hallradius in der Oper = 4,23m) und zweitens in unserer Planung nur 4 Hallgeräte zum Einsatz kommen. Bei einer großen LARES-Installation wären mindestens 16 Geräte verplant, wodurch sich der Abstand deutlich vergrößern würde auf ca. 6m.

Die Tatsache, dass bei einer Probebeschallung mit der Mikrofonposition beliebig variiert werden könnte, erlaubt es sehr nahe an die Schallquelle heran zu gehen, wodurch weniger Probleme mit der Stabilität und den Klangverfärbungen auftreten würden.

6.3 Konzeptplan

In diesem abschließenden Kapitel wird das alle Teilbereiche des Konzepts umfassende Blockschaltbild des geplanten RAK-Systems dargestellt und die Funktionen der einzelnen Blöcke nochmals erklärt. Der in Abb. 6.16 gezeigte Konzeptplan dient als Grundlage für eine tatsächlich in der Grazer Oper durchzuführende Installation des Systems.

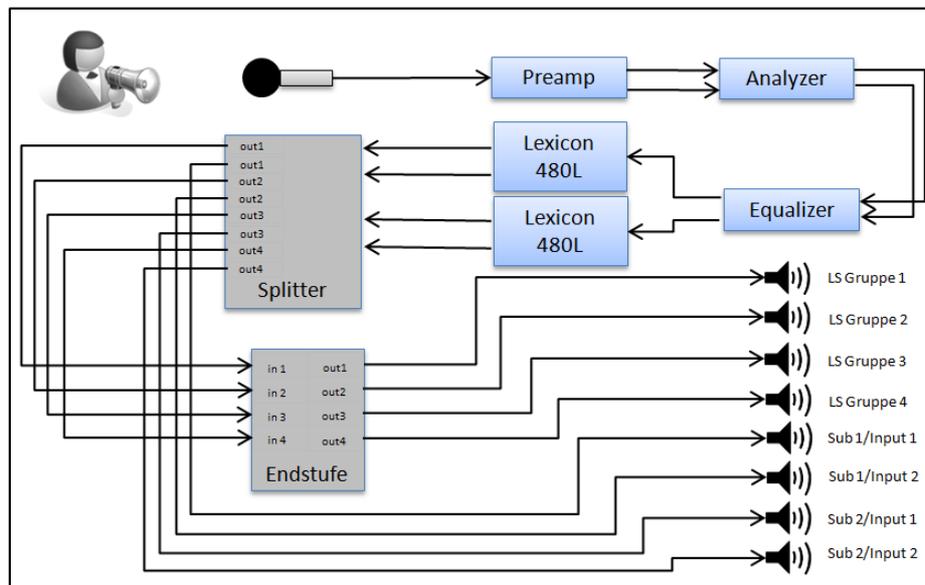


Abb. 6.14: Blockschaltbild des Konzeptplans

Funktionsprinzip:

Das von einer Schallquelle (Sänger, Instrument, etc.) ausgesandte Signal wird von einem hochwertigen Mikrofon mit Nierencharakteristik eingefangen und mittels eines Stereo-Vorverstärkers auf einen passenden Arbeitspegel gebracht. Da die Übertragungsfunktion zwischen Schallquelle und Mikrofon im Normalfall nicht linear ist (Raumeinfluss, Nebengeräusche, Frequenzgang des Mikrofons), wird als nächstes unter Zuhilfenahme eines Spektrumanalysators („Analyzer“) das Signal untersucht und die Überhöhungen bzw. Senken im Frequenzspektrum mittels eines grafischen Equalizers geglättet. Anschließend werden die beiden Lexicon 480L Effektgeräte angesteuert, die zusammen 4 verschiedene, zeitvariante Halleffekte erzeugen können und anhand deren Einstellung alle unter Kapitel 6.1 angeführten Verbesserungsmaßnahmen getestet werden können. Für die Ansteuerung der 4 Lautsprecher Kreise in der Decke und für die zusätzlich verwendeten Subwoofer benötigt man jeden Hallgeräte-Ausgang doppelt. Diese Aufgabe soll eine Splitterbox übernehmen. Der erste Ausgang des jeweiligen Kanals wird danach in eine digitale 4-fach Endstufe geleitet, welche zum Antrieb der Lautsprecher-Chassis in der Decke dient. Der zweite Ausgang wird direkt in den passenden Eingang des Subwoofers weitergeleitet. Die dort eingebaute Frequenzweiche sorgt dafür, dass vom Tieftonlautsprecher nur Signalanteile unter 100Hz verstärkt werden. Über die insgesamt 42 Lautsprecher in der Decke (inkl. der 2 Subwoofer) ist es nun möglich, das bearbeitete Signal in den Raum einzuspielen und dadurch die Akustik des Saales zu verändern.

7 Aufbau, Inbetriebnahme und Bewertung eines limitierten EA-Systems

Als Erweiterung zur Aufgabenstellung dieser Arbeit bot sich die Möglichkeit, das geplante elektroakustische Verbesserungskonzept auch gleich aus zu testen. Da in der Grazer Oper im laufenden Spiel- und Probenbetrieb fast 24 Stunden täglich gearbeitet wird, konnte für Tests nur ein zeitliches Fenster von insgesamt 12 Stunden eingeräumt werden. Durch diese Umstände wurde beschlossen, nur Teile der unter Kapitel 6 geplanten EA-Anlage in Betrieb zu nehmen. Mit diesem „limitierten“ System sollte vorrangig versucht werden, die im Bereich der 3. und 4.Reihe auftretenden Flatterechos zu beseitigen bzw. zu verdecken.

Neben Informationen zur Verkabelung und zum Aufbau des Teilsystems, werden in diesem Kapitel auch alle Einstellungen der einzelnen Komponenten dokumentiert. Ein messtechnischer Vergleich zeigt zusätzlich die Unterschiede zwischen der ursprünglichen und der mit elektroakustischen Mitteln veränderten Raumakustik auf. Gleichzeitig werden subjektive Meinungen der Teilnehmer zum veränderten Höreindruck wiedergegeben.

7.1 Aufbau des limitierten Systems

In Anbetracht der zeitlichen Möglichkeiten konnte nur ein Prototyp des EA-Systems installiert und in Betrieb genommen werden. Im ersten Schritt der Aufbauphase galt es nun abzuwägen, welche Teile der Anlage unbedingt für eine funktionierende Probebeschallung erforderlich sind, um wenigstens zeigen zu können, dass eine Verdeckung der Flatterechos möglich ist. Nach reichlichen Überlegungen und in Anbetracht des sehr knappen zeitlichen Rahmens konnten, bis auf den Anschluss der beiden Subwoofer und die Einbindung des zweiten Lexicon Effektgerätes, alle Abschnitte des Konzeptplans aus Kapitel 6.3 realisiert werden. In Abb. 7.1 ist der minimierte Konzeptplan der EA-Anlage dargestellt.

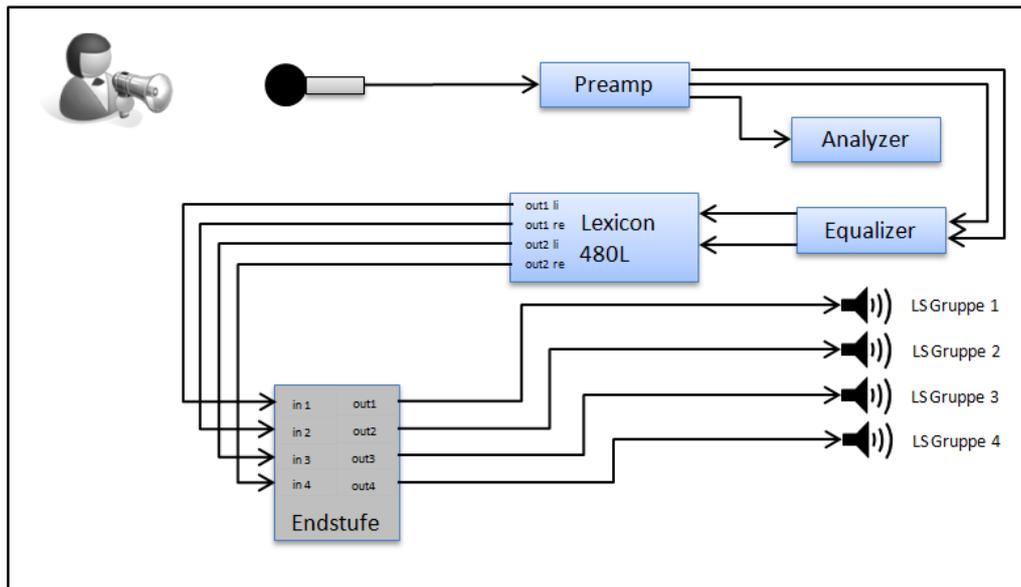


Abb. 7.1: Blockschaltbild des limitierten Systems

Verkabelung und Anschluss der Deckenlautsprecher

Die Verkabelung innerhalb der Deckenlautsprecher wurde gemäß den Schaltplänen aus Kapitel 6.2.1.2 durchgeführt. Insgesamt wurden ca. 500m PVC isolierte Schlitze-Leitungen mit einem Querschnitt von 1,5qmm verlegt. Anhand einer Durchgangs- und Impedanzprüfung konnte das korrekte Zusammenschließen der LS kontrolliert werden (Anm.: Der zeitliche Aufwand für diesen Arbeitsschritt betrug bereits 6 Stunden!). Der Anschluss der 4 LS-Kreise an die digitale 4-fach Endstufe wurde gleich am Dachboden realisiert, da im vorderen Teil der Kuppel ein Steckfeld mit mehreren analogen Ausspielwegen vorhanden war. Das digitale Routing innerhalb des Audionetzwerkes der Grazer Oper ermöglichte es, dass von einem Bodensteckfeld im Parkett aus direkt 4 Audiosignale auf das Steckfeld im Dachboden geschickt werden konnten, welche dann an die 4 Eingänge der Endstufe angeschlossen wurden. Durch dieses Verkabelungsschema konnte die restliche Hardware im Zuhörerbereich aufgebaut werden, wodurch unterschiedliche Einstellungen des Hallgerätes sofort auditiv überprüft werden konnten.

Anschluss des Mikrofons und der restlichen Hardware

Das RAK-Mikrofon „Sennheiser E914“ mit Nierenkapsel wurde am ersten Kanal des Kleinmischpultes „Mackie 1202 VLZ3“ angeschlossen, welches als „Preamp“ und Signalverteiler in dieser Anordnung diente. Aus dem Mackie heraus konnten 2 Ausspielwege an die Eingänge des Grafischen Equalizers weitergeleitet werden. Ein weiterer Abgriff des vorverstärkten Signals führte zum Audioeingang eines Laptops, auf welchem ein Analyzer PlugIn installiert war. Die Verbindungen zwischen den beiden Equalizer Ausgängen und den Lexicon 480L Eingängen, und zwischen den 4 Lexicon Ausgängen und dem Anschlussfeld in der Bodenklappe des Saals mussten ebenfalls noch hergestellt werden. Mit einem kurzen Test

wurde am Ende des Aufbaus der Signalfloss zwischen allen am EA-System beteiligten Elementen überprüft.

7.2 Einstellung der Komponenten und Probebeschallung

Die Intention der Probebeschallung bestand darin, eine Verschleierung der im Bereich der 3. und 4. Reihe auftretenden Echos erzielen zu können. Aus diesem Grund lag es nahe, sowohl das Mikrofon für das RAK-System, als auch das Messmikrofon – für die in Kapitel 7.3 folgenden akustischen Messungen – in diesem Bereich zu platzieren. Die exakte Position des RAK-Mikrofons war in der 3. Reihe in Gangmitte, mit Ausrichtung der Haupt-Einsprechrichtung auf die Hände einer in der 4. Reihe stehenden Person, die durch „in die Hände klatschen“ eine Impulsschallquelle nachahmte. Die Höhe des RAK-Mikrofons betrug 1m über dem Boden. Der Abstand zwischen Mikrofon und Hände betrug ebenfalls ca. 1m. Gemäß den in Kapitel 6.2.2 angegebenen Formeln wird der maximale Abstand zwischen Mikrofon und Quelle neu (für aktuell 2 Hallprozessoren) berechnet um sicherzustellen, dass das RAK-Mikrofon innerhalb des maximal zulässigen Mikrofon-Quelle-Abstandes positioniert war.

$$\frac{d}{ECD} \leq \frac{\sqrt{\frac{\text{Anzahl an Hallgeräte } n}{\text{Anzahl an Mikrofonen je Eingang}}}}{2.3}$$

$$\frac{d}{3.54} \leq \frac{\sqrt{\frac{2}{1}}}{2.3}$$

$$d \leq 3.54 \cdot \frac{\sqrt{\frac{2}{1}}}{2.3} = 2.17m$$

Es ist ersichtlich, dass man mit 1m Abstand deutlich unter der Grenze von 2,17m blieb. In den Abb. 7.2 bis 7.4 werden die genauen Positionen von RAK-Mikrofon und Quelle nochmals dargestellt.

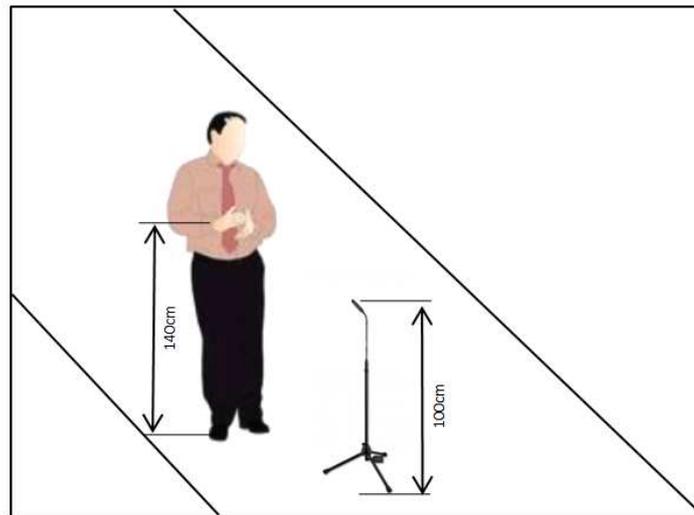


Abb. 7.2: RAK Mikrofonausrichtung (Höhe)

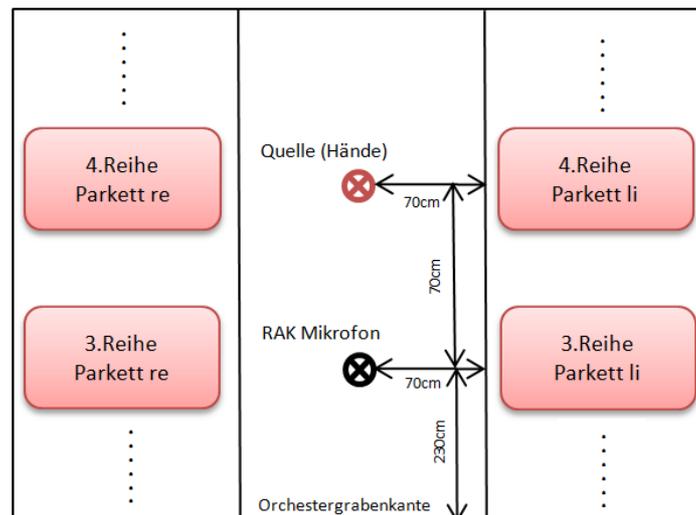


Abb. 7.3: RAK Mikrofonausrichtung (Tiefe und Breite)

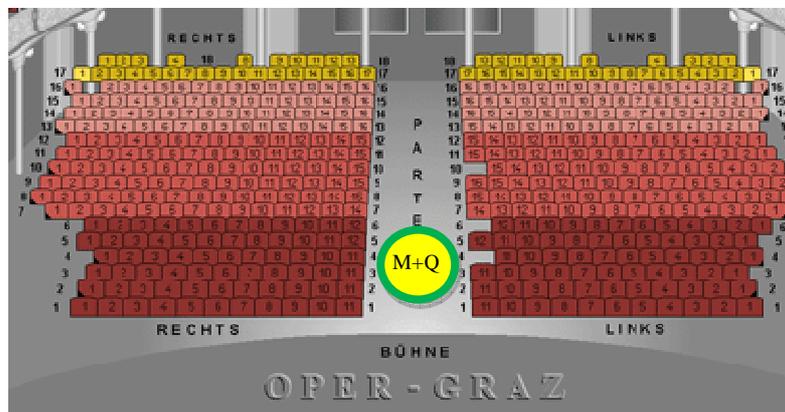


Abb. 7.4: Sitzplan der Oper mit eingezeichneter RAK Mikrofon(M)- und Quellposition(Q)

Einpegeln des Mikrofons und Einstellung des Grafischen Equalizers

Unter Anlegen des maximal zu erwarteten Impulsschallpegels – durch in die Hände klatschen – wurde das Mikrofonsignal mit dem „gain-Regler“ des ersten Mischpultkanals so hoch vorverstärkt, bis ein optimaler Arbeitspegel von ca. 0dBFS am Mischpult erreicht war. Um die Übertragungsfunktion zwischen Schallquelle, Raum, Nebengeräusche und Mikrofon zu glätten, wurde der grafische Terzband-Equalizer Phonic PEQ 3600 verwendet. Da die Zeit für ein exaktes Einstellen des Equalizers (messtechnisch) nicht vorhanden war, wurde auf eine aus der Beschallungstechnik altbewährte Technik, das sogenannte „Einpfeifen“, zurückgegriffen. Dabei wird die Lautstärke der EA-Anlage soweit erhöht, bis eine akustische Rückkopplung hörbar ist. Diese „erzwungenen“ Rückkopplungen treten in erster Linie dort auf, wo es Überhöhungen im Frequenzspektrum gibt. Durch anschließendes adäquates Absenken der sich aufschaukelnden Frequenzen am grafischen Equalizer wird die Übertragungsfunktion optimiert.

Zum besseren „Aufspüren“ der Koppelfrequenzen diente in diesem System das auf einem Laptop installierte Analyzer PlugIn jDFT 2.5, auf welchen man sich die exakten Frequenzen visuell darstellen lassen konnte.

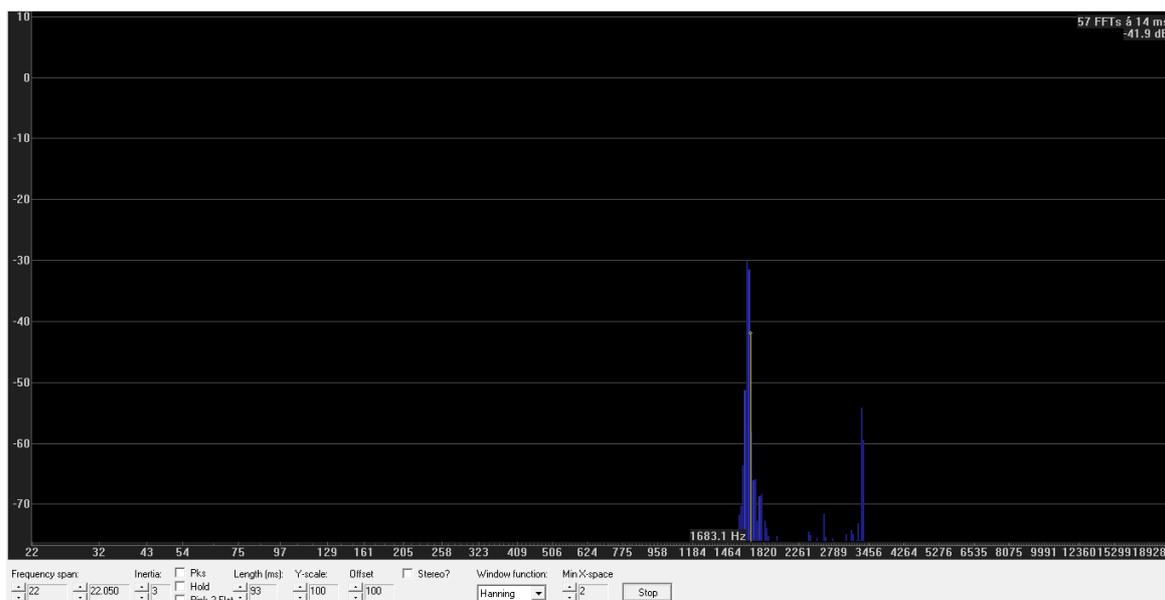


Abb. 7.5: Beispielplot des Analyzer PlugIn`s jDFT 2.5

Einstellung des Hallgerätes

Da für die Probeschallung im Endeffekt „nur“ die Verdeckung der unerwünschten Echos als Ziel definiert wurde, beschränkte sich die Einstellung des Lexicon 480L Hallgerätes auf die Tatsache, dass ein Hall Programm („Small RHall & Stage“) geladen wurde, bei dem die Early Reflections durch 4 voneinander unabhängigen Verzögerungen („Delays“) erzeugt werden. Durch spezielle Konfiguration aller am Hallalgorithmus beteiligter Parameter konnte während der Probeschallung eine Einstellung gefunden werden, bei der hauptsächlich die 4

Delays an der Entstehung des Klangeindrucks beteiligt waren. Die für jede Verzögerung getrennte Festlegung von „Delay Time“ und „Delay Level“ ermöglichte nun das gezielte platzieren von 4 Reflexionen vor jenem Zeitbereich, wo die störenden Echos auftreten.

Zur Bestimmung der genauen Delay-Zeiten dienten hauptsächlich die Messergebnisse aus Kapitel 7.3. Dort stellte sich heraus, dass die ersten Echos nach ca. 74ms beim Hörer eintreffen.

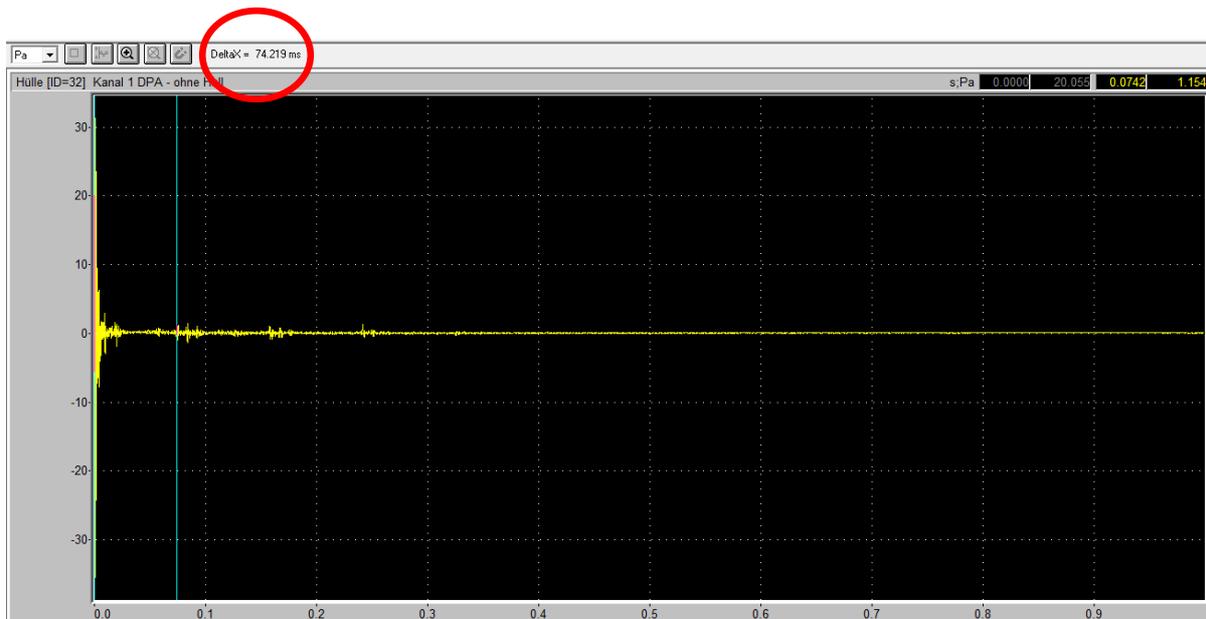


Abb. 7.6: Raumimpulsantwort; 4.Reihe Mitte ohne künstliche Early Reflections

Vernachlässigt man den geringen Abstand zwischen Mikrofon und Quelle und bedenkt man, dass von den Deckenlautsprechern bis zu den Sitzplätzen der 3. und 4.Reihe bereits eine natürliche Verzögerung von 35ms entsteht, so konnte man – mit gewählten Delayzeiten von unter ca. 30ms – die ersten Reflexionen sehr gut vor das erste Echo legen. In Konklusion mit der Anzahl der verwendeten Lautsprechern war man somit in der Lage ein ausreichend starkes Diffusschallfeld zu erzeugen, um die Echos beinahe ganz „verdecken“ zu können (siehe speziell Punkt 7.3.4).

Für eine genaue Beschreibung aller Einstellparameter des Hallgerätes sei auf die Bedienungsanleitung verwiesen, die auf der Lexicon Homepage (www.lexiconpro.com) zum Download bereit steht. Da der 480L mit zwei autonom arbeitenden Effektprozessoren ausgestattet ist, wurden der zeitlichen Knappheit wegen, die Delay-Einstellungen der Maschine „A“ des Lexicon 480L auch auf die Maschine „B“ desselben Gerätes übernommen. An allen Ausgängen des Effektgerätes lag somit das gleiche Signal an. Die durch „Austesten“ herausgefundenen sehr gut funktionierenden Einstellungen der Early Reflections sind in Tabelle 7.1 dargestellt.

Tab. 7.1: Einstellungen der Early Reflections in der Maschine „A“ des Lexicon 480L

LVL1	LVL2	LVL3	LVL4	SPN	WAN
-6dB	-2dB	0dB	-1dB	43	6762 μ s
DLY1	DLY2	DLY3	DLY4	SHL	RLV
7ms	8ms	15ms	24ms	0	160

SPN..... Spin variiert minimal die Einsetzzeitpunkte der Delays und sorgt dadurch für einen natürlicheren Klang.

WAN.....Wander setzt den zeitlichen Abstand fest, mit dem die Einsetzzeitpunkt der Early Reflections variieren sollen.

SHL.....Shelf bewirkt einen zusätzliche Absenkung bei hohen Frequenzen und ermöglicht dadurch eine sogenannte „double knee“ Kurve beim Tiefpassfilter.

RLV.....Reverb Level (160 = max.)

Einstellung der Master-Lautstärke des RAK-Systems

Die Einstellung der Master-Lautstärke des RAK-Systems fand aus zeittechnischen Gründen alleine nach dem Gehör statt. Dabei wurde die Lautstärke so hoch gewählt, bis die Verdeckung der Flatterechos in Gangnähe (durch die zusätzlich eingespielte Schallenergie) ein zufriedenstellendes Ergebnis lieferte. Es hat sich bei den Probebeschallungen herausgestellt, dass auf Grund des limitierten Aufbaus das System eine minimale klangfärbende Wirkung auf die Saalakustik hatte, die zu Gunsten der funktionierenden Echoverdeckung in Kauf genommen werden musste.

7.3 Akustische Messungen und Vorher/Nachher Vergleich

Nachdem mit denen unter Punkt 7.2 gefundenen Einstellungen die auditive Verdeckung der Echos als gelungen bezeichnet werden konnte, sollte eine zusätzliche akustische Messung diesen subjektiven Höreindruck bestätigen. Da durch Hinzufügen von Zeitvarianz die MLS-Methode nicht angewandt werden konnte (siehe Kapitel 5), wurden Impulsschallmessungen im Bereich der 4.Reihe in der Mitte des Ganges durchgeführt, bei denen abwechselnd die elektroakustische Anlage ein- bzw. ausgeschaltet war.

7.3.1 Impulsschall-Messmethode

Bei der Impulsschallmethode wird die Raumimpulsantwort direkt gemessen, nachdem der Raum mittels eines breitbandigen Impulses ausreichend mit Schallenergie angeregt wurde. Aus dem daraus abgeleiteten Energie-Zeit-Verlauf lassen sich alle für die Raumakustik interessanten Energiemaße berechnen. Als Erregersignale dienen häufig ein Pistolknall oder eine Funkenstrecke, wobei im Grunde genommen jede impulsartige Schallquelle dafür benutzt werden kann vorausgesetzt, die Anregung ist breitbandig und ihr Spitzen-Schalldruckpegel ist hoch genug. [RAK]

7.3.2 Messaufbau

Als Messsystem kam dieselbe Hard- und Software zum Einsatz, wie bereits unter Kapitel 3. Der einzige Unterschied bestand darin, dass bei dieser Messung nicht der Dodekaeder als Quelle eingesetzt wurde, sondern eine Impulsschallquelle in Form einer „in die Hände klatschenden“ Person. Ansonsten gleicht der Messaufbau jenem aus Kapitel 3.1.2.

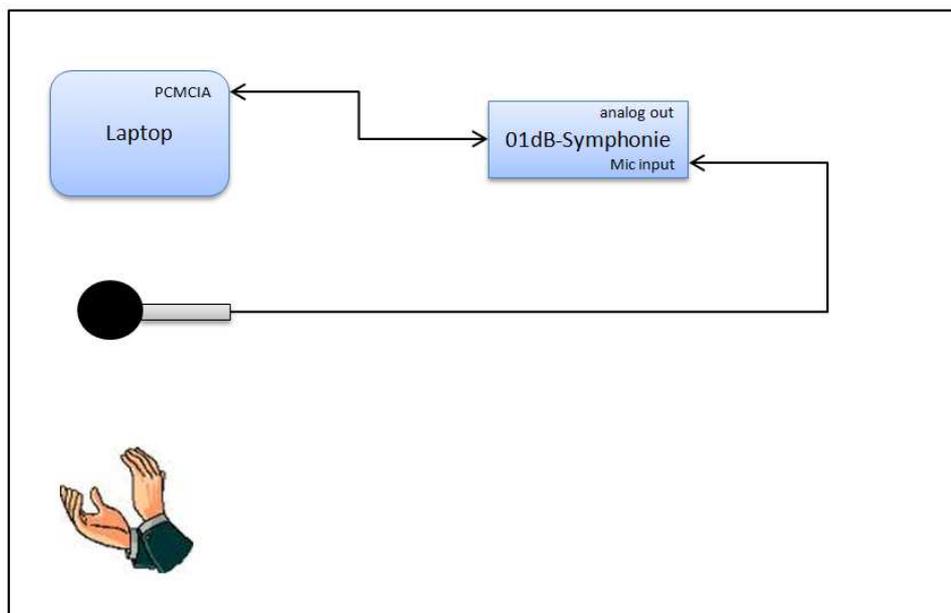


Abb. 7.7: Messaufbau bei der Impulsschallmessung

7.3.3 Messmikrofonanordnung und Quellenposition

Da das Flatterecho im Bereich der 4.Reihe im Parkett am stärksten auftritt, war es naheliegend genau dort das Messmikrofon aufzustellen, um die unerwünschten Reflexionen grafisch am besten darstellen zu können. Als Position für die Quelle wurde ebenfalls die Mitte des Ganges in der 4.Reihe gewählt, da dort die Anregung und somit auch die Ausprägung des Flatterechos am besten funktionierten. Das Messmikrofon war auf einem Stativ in der Höhe

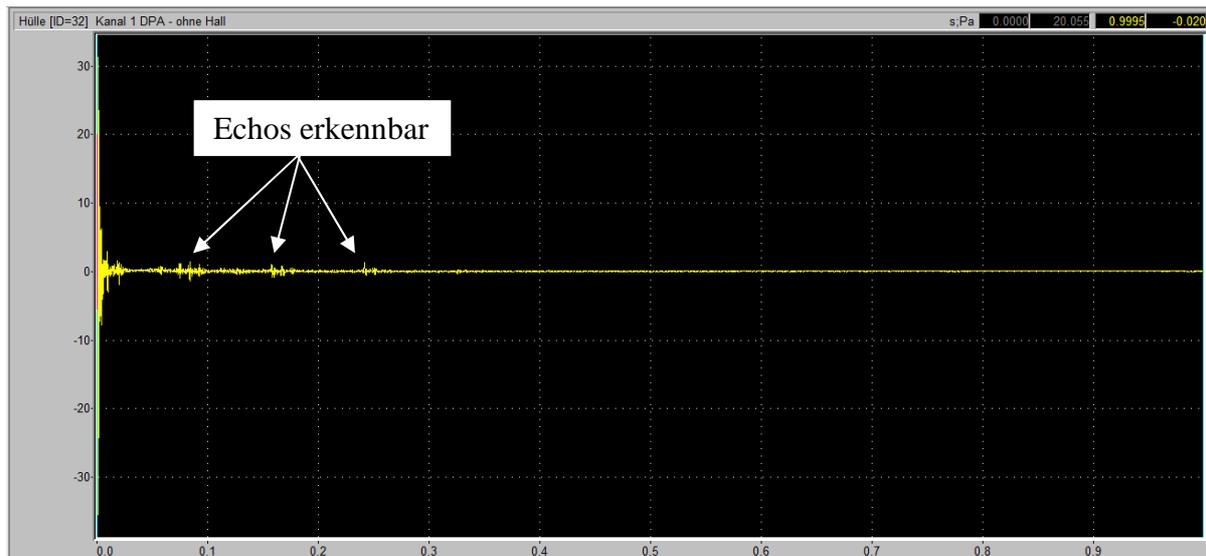
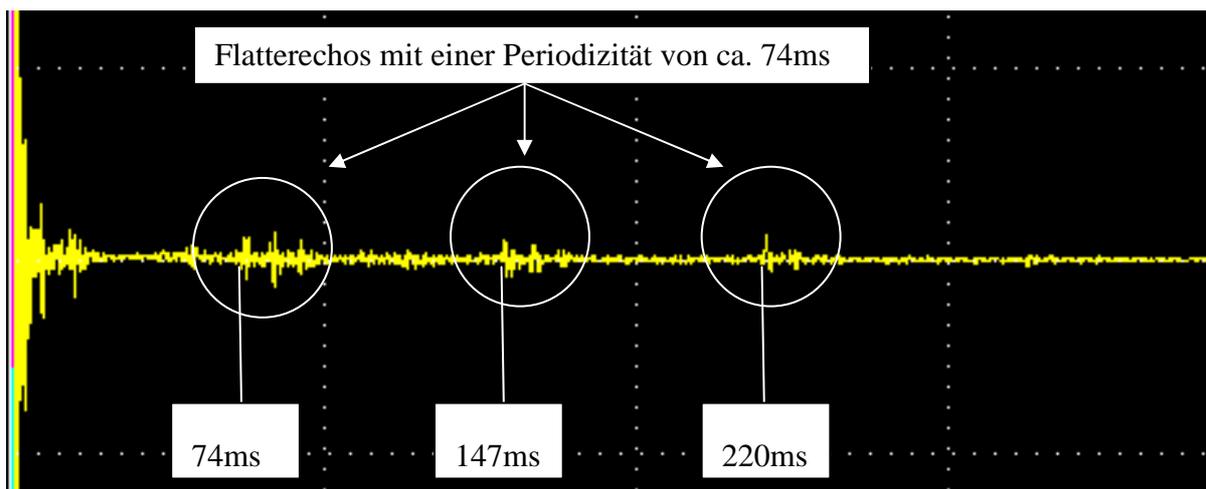
von 1,2m über dem Boden angebracht und das impulsartige Händeklatschen wurde direkt über dem Mikrofon – mit einem Abstand von ca. 20cm – ausgeführt. Weil diese Messungen nur aus Gründen der Veranschaulichung bzw. der Verifizierung der subjektiven Hörempfindungen durchgeführt wurden, mussten die unter Punkt 3.2.3 aufgelisteten Vorgaben nicht exakt eingehalten werden. Auch die Verwendung einer uniformen Anregungsquelle (z.B. Pistolenschuss) war zum Zwecke dieser Demonstrationsergebnisse nicht zwingend notwendig.

7.3.4 Messtechnischer Vergleich ohne/mit RAK-System

Ein Vergleich der Raumimpulsantworten beider Zustände (ohne/mit RAK-System) stellt grafisch den Einfluss der Beschallungsanlage auf die Raumakustik des Saales dar. Die Interpretation der Ergebnisse stützt sich sowohl auf die subjektiven Hörerfahrungen, als auch auf die objektiven Messdaten.

Messprotokoll Impulsschallmessung

Datum:	12.04.2011
Ort:	Grazer Oper
Messzeit:	10:35 bis 11:40
Temperatur:	21°C
Luftfeuchte:	20%
Besonderheiten:	Absolute Ruhe im Saal; sehr gutes Ansprechen der Flatterechos

Raumimpulsantwort ohne RAK-System**Abb. 7.8:** Raumimpulsantwort; 4.Reihe Mitte ohne RAK-System**Abb. 7.9:** Raumimpulsantwort; 4.Reihe Mitte ohne RAK-System; Flatterechos (vergrößert)

Betrachtet man eine in der 4.Reihe im Mittelgang gemessene Impulsantwort des Raumes (Abb. 7.8 und 7.9), so sind recht deutlich die an dieser Stelle vorhandenen Flatterechos erkennbar. Das Heraus messen der Verzögerungszeiten ergab, dass nach ca. 74ms die ersten Echos beim Messmikrofon eintreffen. Nach dem doppelten der Zeit, also ca. 147ms sieht man die zweiten, nach rund 220ms die dritten Echos. Vergleicht man diese Ergebnisse mit den Flatterecho-Untersuchungen anhand des Simulationsmodells von Seite 84 so fällt auf, dass sich die Zeitangaben von Messung und Simulation sehr gut decken. Für die in beiden Analyseverfahren festgestellte Echo-Periodizität von ca. 70ms kann somit bestätigt werden, dass die sehr hohe Decke der Oper für die Ausbildung dieser Echoeffekte verantwortlich ist (Erklärung dazu siehe S.85). Auch der in der Oper empfundene Höreindruck verifiziert diese Aussage indem es scheint, als kämen die Flatterechos über die Decke.

Raumimpulsantwort mit RAK-System

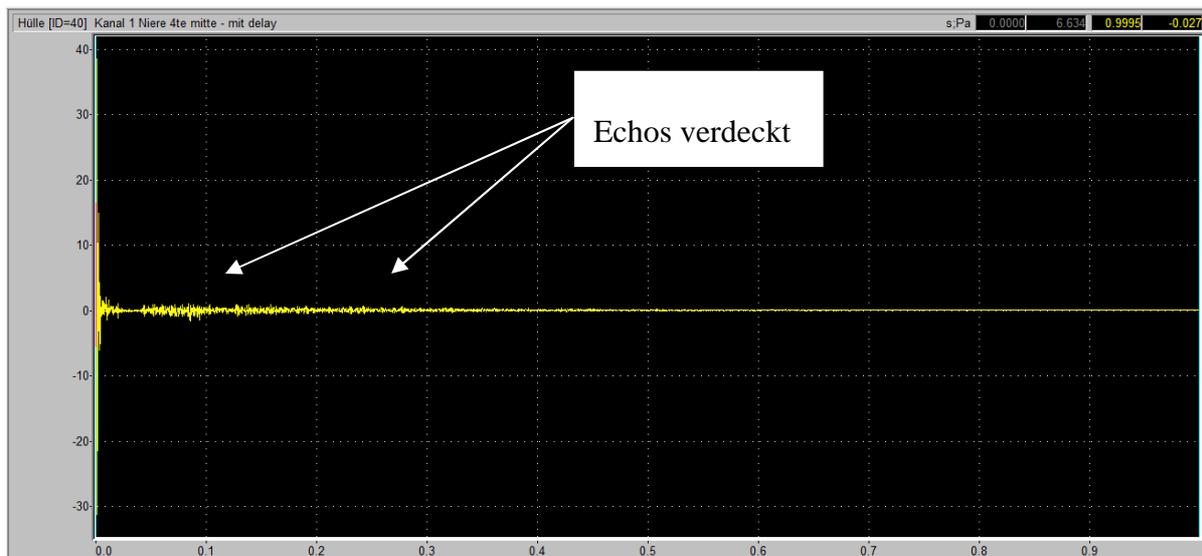


Abb. 7.10: Raumimpulsantwort; 4.Reihe Mitte mit RAK-System

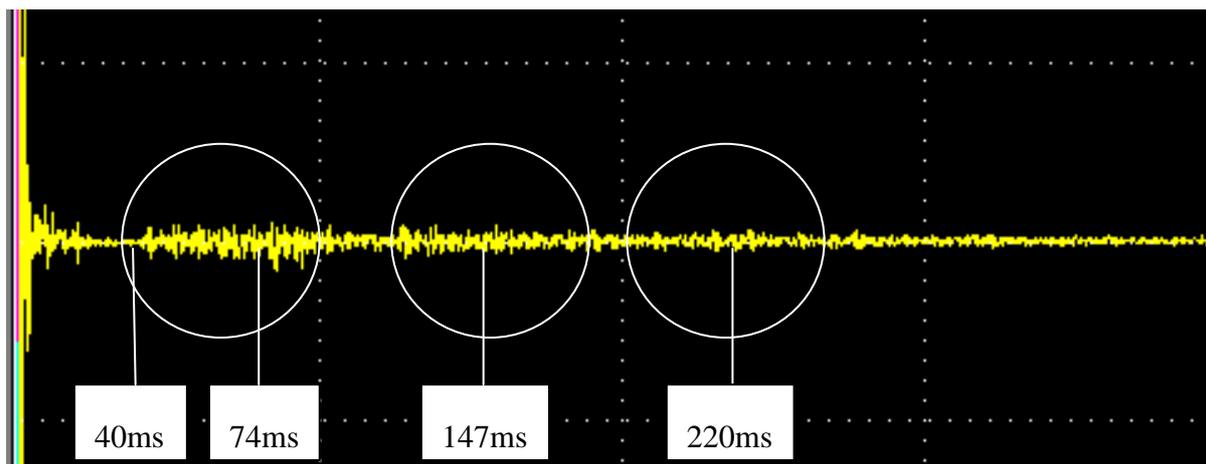


Abb. 7.11: Raumimpulsantwort; 4.Reihe Mitte mit RAK-System; Echos verdeckt (vergrößert)

Im Vergleich zu der Raumimpulsantwort ohne RAK-System (Abb. 7.9) sieht man in Abb. 7.11 schon deutlich die zusätzlich vorhandene Energie im Bereich ab 40ms. Das Einsetzen der künstlich zugespielten Early Reflections nach ca. 40ms (vgl. Kapitel 7.2 → *Einstellung des Hallgerätes*) führt zu einer klar erkennbaren Verdeckung der starken ersten Echos.

Da die frühen Schallrückwürfe ihrerseits wieder reflektiert werden von z.B. dem Boden und den Seitenwänden, treten auch die 2. und die 3.Echos nicht mehr so stark in Erscheinung. Da sichtbar mehr Schallenergie zwischen 50 und 150ms vorhanden ist, muss mit einer geringen Abnahme der Klarheit und der Durchsichtigkeit des Schallfeldes gerechnet werden.

Vergleich der Nachhallzeiten ohne/mit RAK-System

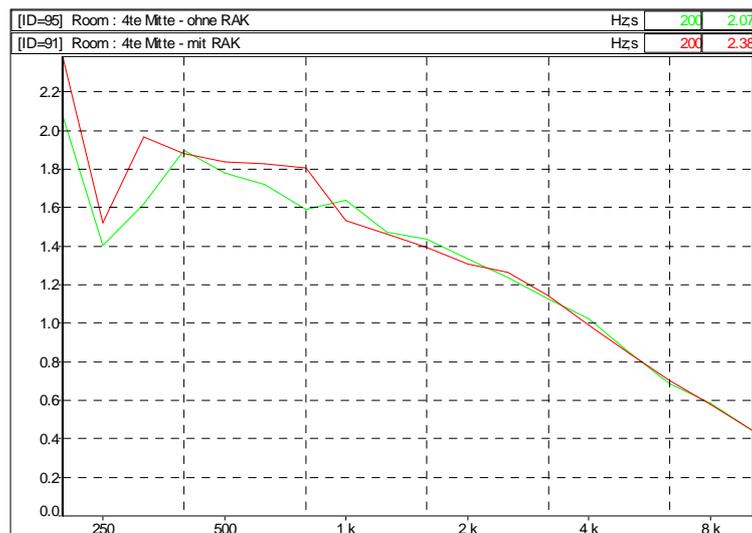


Abb. 7.12: Nachhallzeitenvergleich ohne/mit RAK-System

Natürlich hat der in Abb. 7.12 gezeigte Vergleich der Nachhallzeiten eine nicht allzu große Aussagekraft, da der impulsartigen Anregung des Raumes mittels „in die Hände klatschen“ keine uniforme Schallquelle zu Grunde steht, trotzdem kann man bereits eine Tendenz in Bezug auf die Nachhallzeitenwicklung durch Hinzufügen der künstlichen Early Reflections ablesen. Generell betrachtet, hat das RAK-System in den Frequenzen unter 1kHz einen größeren Einfluss auf die Saalakustik, als bei den darüber liegenden. Ein durchschnittlicher Anstieg der Nachhallzeiten um 0,13s – im Frequenzbereich 200Hz bis 1000Hz – konnte aus der im Anhang befindlichen Nachhallzeitentabelle bestimmt werden. Über 1kHz sind nur marginale Unterschiede zwischen den beiden Nachhallkurven erkennbar, wodurch die in Kapitel 6.1 geplante Verbesserungsmaßnahme zur Anhebung der Brillanz, unabhängig von der Echoverdeckung, durchgeführt werden könnte.

7.4 Fazit zur Funktionalität des limitierten RAK-Systems

Da das Auftreten von Flatterechos ein akustischer „Spezialfall“ ist und dessen Beseitigung normalerweise nur durch bauakustische Maßnahmen gelöst werden kann, so wird mit diesem elektroakustischen RAK-System gezeigt, dass eine Verdeckung von Echoeffekten auch elektroakustisch funktioniert. Als eine zusätzliche Besonderheit konnte bestätigt werden, dass das Hinzufügen von künstlich eingespielten Early Reflections ausreicht, um die Nachhallzeit in geringem Maße anzuheben. Die bei den Probebeschallungen festgestellten, relativ geringen Klangverfärbungen durch die Anlage lassen sich in erster Linie auf den hohen Pegel des Systems zurückführen, der eingestellt werden musste, um die sehr stark auftretenden Flatterechos im Saal überhaupt erst verdecken zu können. Diese Tatsache könnte sehr einfach verbessert werden, indem das vollständig geplante System in Betrieb genommen werden würde. Durch eine erneute Einstellung aller Komponenten und mit dem dafür nötigen zeitlichen Freiraum, könnte man das Ergebnis optimieren und die unter Kapitel 6.1 angestrebten weiteren Verbesserungsmaßnahmen ebenso durchführen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Obwohl die Grazer Oper als einzigartiges und überaus gelungenes Bauwerk angesehen wird, so haben sich in den letzten Jahren doch ein paar kleinere Defizite und Verbesserungswünsche im Bereich der Akustik herauskristallisiert (störende Flatterechos im Parkett, fehlende Klangdurchmischung bzw. Einhüllung, zu geringe Nachhallzeit bei Konzerten). Mit dieser Arbeit sollten nun elektroakustische Verbesserungsmaßnahmen entwickelt werden, da auf Grund des Denkmalschutzes bauakustische Veränderungen in der Oper nicht vorgenommen werden dürfen.

Nach Auflistung grundlegender Informationen zur Schallausbreitung und zu raumakustischen Parametern wurde im ersten Teil der raumakustischen Analyse der Grazer Oper eine flächendeckende akustische Vermessung des Saales durchgeführt. Die Analyse der aus den Messdaten erhaltenen Parameter Nachhallzeit, Anfangsnachhallzeit und Klarheitsmaß ergab, dass die Oper für Sprachwiedergaben und Operndarbietungen akustisch sehr gut geeignet ist. Der warme, neutrale Klangcharakter wird nur durch einen etwas zu geringen Höhenglanz leicht gestört und die Klangdurchmischung nimmt zu hohen Frequenzen hin zu stark ab. Des Weiteren konnte herausgefunden werden, dass am Balkon die besten Zuhörerplätze vorhanden sind. Mit einem erstellten Simulationsmodell der Grazer Oper wurde danach die raumakustische Analyse anhand der Simulationsergebnisse fortgesetzt. Die Untersuchungen zur Schalldruckpegelverteilung zeigten, dass leichte Pegelüberhöhungen in der Mitte des linken und rechten Parketts vorhanden sind, diese aber nicht dezidiert dem Fokussierungsproblem zugesprochen werden können. Im Gegensatz dazu wurde das Auftauchen von Flatterechos auch in der Simulation sichtbar. Der Wunsch zur Verbesserung der akustischen Gesamtsituation in der Oper führte dazu, dass in dieser Arbeit Ideen zur Optimierung der akustischen Defizite sowie zur Verlängerung der Nachhallzeit entwickelt, und ein vollständiges elektroakustisches RAK-System geplant wurden. Als zusätzliche, praktische Durchführung und im Sinne einer Machbarkeitsstudie konnte die Verdeckung der Flatterechos im Bereich des Mittelganges in der 3. und 4. Reihe mittels eines limitierten RAK-Systems getestet werden. Unter Durchführung von mehreren Probebeschallungen wurde schlussendlich eine Konfiguration gefunden, bei der die Verdeckung der Echoeffekte – mit kleinen Abstrichen in Bezug auf Klangverfärbungen – hörbar funktionierte. Der zur objektiven Verifizierung des Höreindrucks durchgeführte messtechnische Vergleich bestätigte den gelungenen Versuch, Flatterechos elektroakustisch verdecken zu können.

8.2 Ausblick

Als eine besonders nutzbringende Entwicklung dieser Arbeit geht das akustische Simulationsmodell der Grazer Oper hervor, das in Zukunft für einige wichtige Aufgaben herangezogen werden kann. Es soll sowohl bei Fragestellungen im Bereich akustisch-visuelle Zusammenhänge z.B. für die akustische Optimierung von Bühnenbildern, als auch bei der Planung von beschallungstechnischen Aufgaben eingesetzt werden.

Da der zeitliche Rahmen für diese Arbeit durch eine vollständige Installation und Inbetriebnahme der geplanten Beschallungsanlage deutlich überschritten worden wäre, wäre es äußerst interessant zu sehen, wie sich das komplette, perfekt eingestellte RAK-System im Unterschied zu der limitierten Version verhält. Es kann erwartet werden, dass eine deutliche Verbesserung der akustischen Situation im Saal erreicht wird und die Oper zu einer Investition in ein solches System bereit wäre. Wie bis zum Abgabzeitpunkt dieser Diplomarbeit bekannt wurde, ist bereits eine Folgearbeit vergeben, die sich mit der Umsetzung des vollständigen Systems beschäftigt.

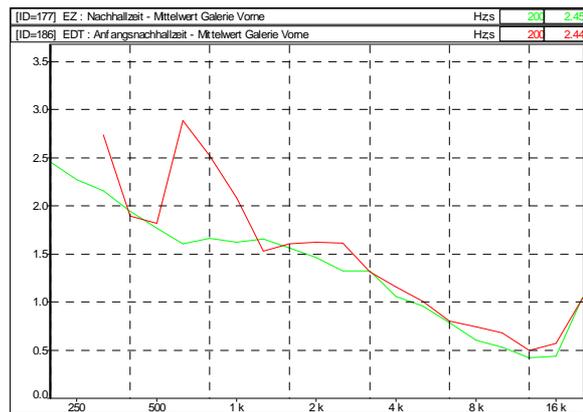
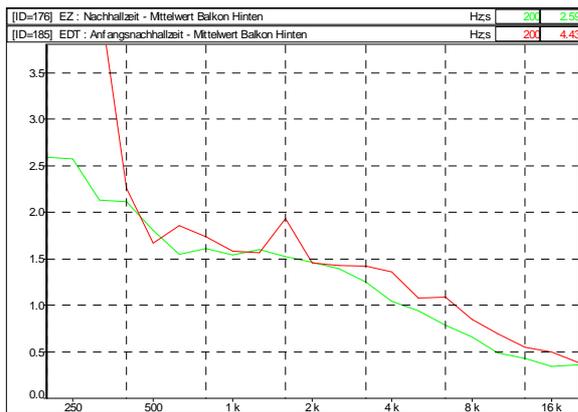
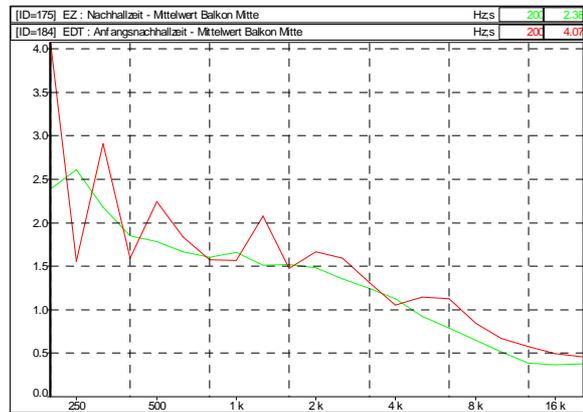
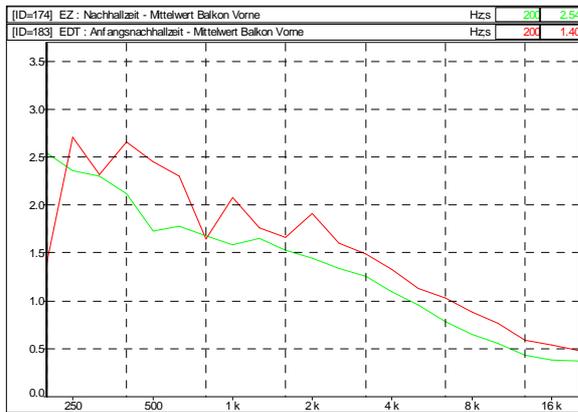
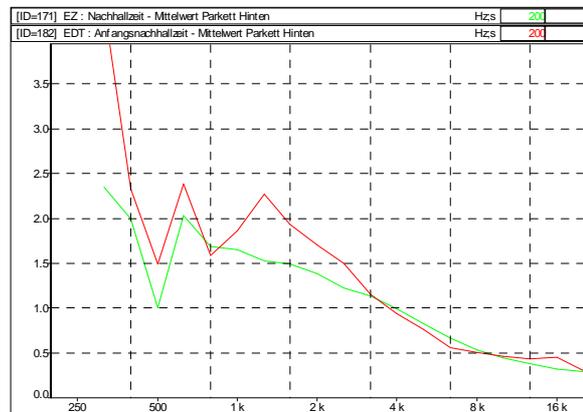
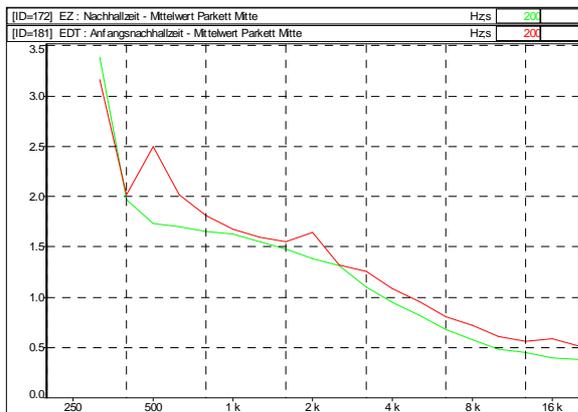
9 Anhang

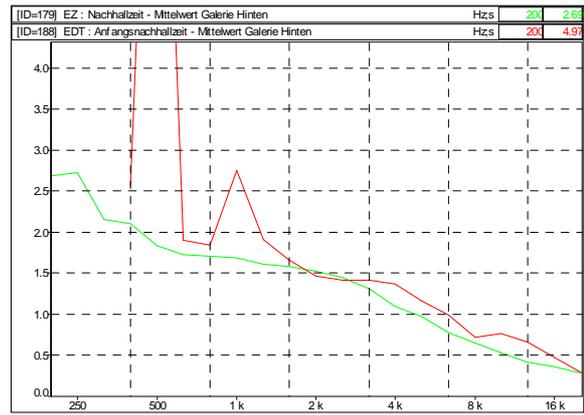
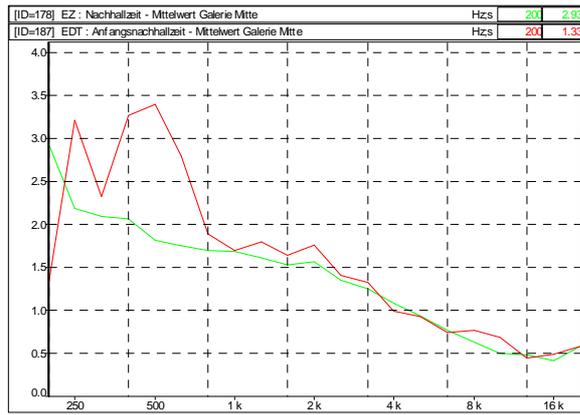
9.1 Anhang A

9.1.1 RT-Werte des leeren und des voll besetzten Saals

C:\...\T60_Ränge.CMG		
ID	165	199
Familie	EZ	EZ
Typ		Room
Auflösung der X-Achse	1/3	1/3
Datum	15.02.10 10:22:23	05.08.11 09:00:04
Kanalort	Nachhallzeit	Nachhallzeit simuliert
Kommentare	Mittelung Saal	Mittelwert Saal voll besetzt
Kanal	1	
Hz	s	s
200	---	2,02
250	2,58	1,96
315	2,13	1,85
400	1,99	1,78
500	1,68	1,51
630	1,71	1,40
800	1,65	1,41
1 k	1,61	1,38
1.25 k	1,57	1,30
1.6 k	1,50	1,18
2 k	1,41	1,16
2.5 k	1,32	1,05
3.15 k	1,19	0,98
4 k	1,03	0,94
5 k	0,88	0,76
6.3 k	0,73	0,69
8 k	0,61	0,61
10 k	0,49	0,53

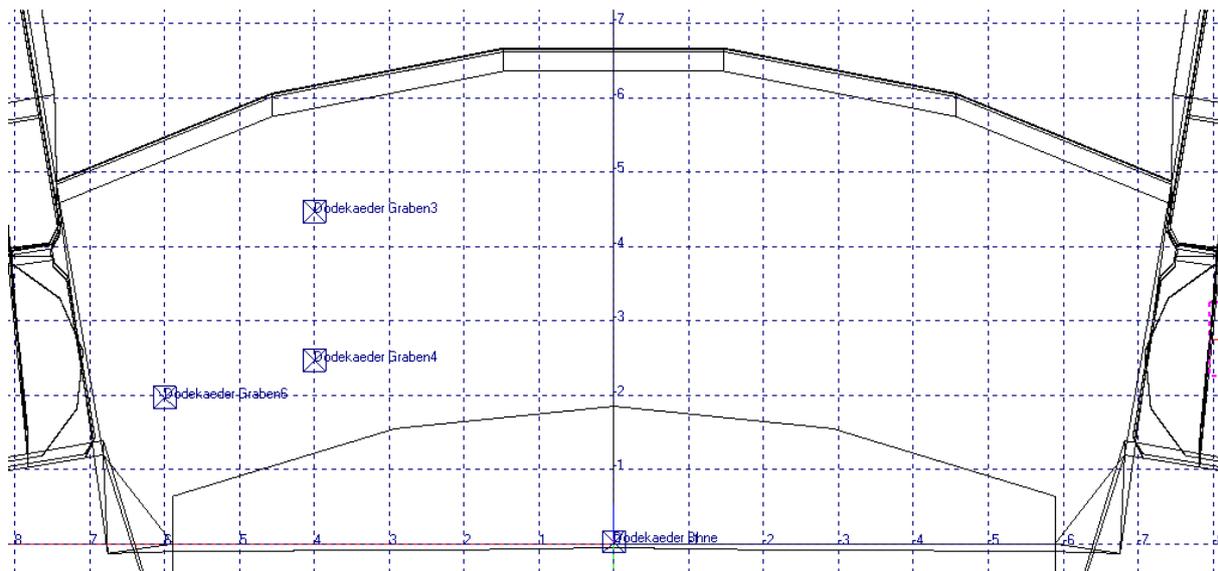
9.1.2 RT/EDT Kurven zur Klassifizierung von Sitzplatzbereichen





9.1.3 Quellepositionen bei der weiterführenden Analyse

Bezeichnung	Bezeichnung im Modell	x-Wert	y-Wert	z-Wert (Höhe)
QPB	Dodekaeder Bühne	0m	0m	1,3m
QP3	Dodekaeder Graben 3	4m	- 4,5m	1m
QP4	Dodekaeder Graben 4	4m	- 2,5m	1m
QP6	Dodekaeder Graben 6	6m	- 2m	1m



9.1.4 Nachhallzeitenvergleich ohne/mit RAK-System

C:\...\Flatterechos.CMG		
ID	95	91
Familie	EZ	EZ
Typ	Room	Room
Auflösung der X-Achse	1/3	1/3
Datum	13.04.11 12:07:42	13.04.11 12:04:38
Kanalort	4te Mitte	4te Mitte
Kommentare	ohne RAK	mit RAK
Kanal	1	1
Hz	s	s
200	2,07	2,38
250	1,40	1,52
315	1,62	1,96
400	1,89	1,88
500	1,77	1,83
630	1,72	1,82
800	1,59	1,80
1 k	1,64	1,53
1.25 k	1,47	1,46
1.6 k	1,43	1,39
2 k	1,33	1,31
2.5 k	1,24	1,26
3.15 k	1,12	1,14
4 k	1,02	0,99
5 k	0,84	0,84
6.3 k	0,68	0,70
8 k	0,58	0,58
10 k	0,44	0,44

10 Literaturverzeichnis

[AGO] OPERNHAUS GRAZ GmbH: *Teilweise handgezeichnete Pläne der Oper*. Archiv der Grazer Oper, Graz, 2010

[AO1] Audioone GmbH: *Akustik: Raum- und Elektroakustische Simulation*. online auf www.audioone.de/flash/akustik/a_ease.html, Berlin, aufgerufen am 17.11.2010

[AO2] Audioone GmbH: *Akustik: Raum- und Elektroakustische Simulation, EASE Tutorial Deutsch*. online auf www.audioone.de/download/akustik/a_ease/ease_tutorial_deutsch.pdf, Berlin, aufgerufen am 17.11.2010

[BAR] BARBAR S.: *Further Developments in the design, implementation, and performance of time variant acoustic enhancement systems*. Lexicon Inc. 1994, online auf <http://www.lares-lexicon.com/pdfs/Windermere.pdf>, aufgerufen am 05.01.2011

[BARR] BARRON M.: *Balconies in concert halls*. Proceedings of the 15th international Congress on Acoustics, Trondheim, Norway, June, 1995

[BER] BERANEK Leo L.: *Concert and Opera Halls: How They Sound*. American Institute of Physics, First Edition, April 1996

[BNW1] BauNetz Media GmbH: *Glossarbegriffe: Akustische Raumimpulsantwort*. online auf http://www.baunetzwissen.de/glossarbegriffe/Akustik_Raumimpulsantwort_44915.html?index=R, Berlin, aufgerufen am 02.11.2010

[BNW2] BauNetz Media GmbH: *Einführung: Messung der Nachhallzeit und der Anfangsnachhallzeit EDT*. http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Akustik_Messung-der-Nachhallzeit-und-der-Anfangsnachhallzeit-EDT_147635.html?img=0&layout=galerie, Berlin, aufgerufen am 24.10.2010

[BT] AHNERT W., STEFFEN F.: *Beschallungstechnik – Grundlagen und Praxis*. Hirzel Verlag, Leipzig, 1993

[CREM] CREMER L., MÜLLER H.: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Bd 1*, Stefan Hirzel Verlag, Stuttgart, 1978

- [DMA] Digital Media for Artists: *Grundlagen: Audio: Schall: Schallausbreitung*. online auf <http://www.dma.ufg.ac.at/app/link/Grundlagen%3AAudio/module/4612?step=all#chapter>, Wien, aufgerufen am 07.10.2010
- [EA] ZOLLNER M. und ZWICKER E.: *Elektroakustik*. 3.Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1993
- [FN] freenet.de GmbH: *Reflexion (Physik)*. online auf [http://lexikon.freenet.de/Reflexion_\(Physik\)](http://lexikon.freenet.de/Reflexion_(Physik)), Hamburg, aufgerufen am 25.10.2010
- [GOE] GÖRNE T.: *Tontechnik*. 1.Auflage, Carl Hanser Verlag, Leipzig, 2006
- [GRIE1] GRIESINGER D.: *Improving room acoustics through time variant synthetic reverberation*. Lexicon Inc. 1991, online auf <http://www.lares-lexicon.com>, aufgerufen am 03.01.2011
- [GRIE2] GRIESINGER D.: *Recent experiences with electronic acoustic enhancement in concert halls and opera houses*. Lexicon Inc., online auf <http://www.davidgriesinger.com/icsv.pdf>, aufgerufen am 03.01.2011
- [GRIE3] GRIESINGER D.: *Variable Acoustics using Multiple Time Variant Reverberation: recent experiences in Halls, Churches and Opera Houses*. Lexicon Inc. 2001, online auf <http://www.davidgriesinger.com/ica2001.pdf>, aufgerufen am 04.01.2011
- [GRIE4] GRIESINGER D.: *Spaciousness and envelopment in musical acoustics*. Lexicon Inc. 2001, online auf <http://www.davidgriesinger.com/spac4.pdf>, aufgerufen am 08.01.2011
- [HDT] DICKREITER M.: *Handbuch der Tonstudioteknik*. Sauer Verlag KG, München, 1997
- [HEU] HEUTSCHI K., HEUTSCHI H.: *Interaktion von Schall und Raum*. (6/2008) online auf http://www.nextroom.at/data/media/med_binary/original/1228912319.pdf, aufgerufen am 20.12.2010
- [HOP] HOPKINS, STRYKER: *A Proposed Loudness-Efficiency Rating for Loudspeakers and the Determination of System Power Requirements for Enclosures*., Reprinted from the March 1948 Edition of the Proceedings of the I.R.E., 1948
- [JBL] JBL Incorporated: *Enhanced Acoustic Simulator for Engineers*. online auf www.jblpro.com/pages/software/software.htm, Harman Consumer, Inc., aufgerufen am 17.11.2010
- [JUN] JUNKER G.: *Musikwissenschaft: LV Raumakustik I, geometrische Raumakustik*. online auf http://gerhard.junker.info/musikwissenschaft/raumakustik/V3_Raumakustik_Beschallungstechnik_geometrischeRaumakustik.pdf, Wien, aufgerufen am 20.10.2010

- [JUN02] JUNKER G.: *Einführung in die Raumakustik und Beschallungstechnik*. online auf http://gerhard.junker.info/musikwissenschaft/raumakustik/V4_Raumakustik_Beschallungstechnik_Nachhall.pdf, Wien, aufgerufen am 20.10.2010
- [KRE] KREJCI P.M.: *Entwicklung eines Mehrkanaligen Systems für eine virtuelle Raumakustik*. Universität für Musik und Darstellende Kunst Graz, Institut für elektronische Musik und Akustik, Oktober 2001
- [KRO] KROKSTAD A.: *Electroacoustic Means of Controlling Auditorium Acoustics.*, University of Trondheim, Report number 408507, The Norwegian Institute of Technology Division of Telecommunications O.S.Bragstads plass 4, N7034 Trondheim-nth, Norway
- [OGS] Opernhaus Graz GmbH: *Sitzplan der Oper Graz*. online auf http://www.buehnen-graz.com/img_saalplan_oh.htm, aufgerufen am 25.10.2010
- [POL] POLETTI M.A.: *The philosophy of the Variable Room Acoustics System*, homepage VRAS, 2001
- [RAK] GRABER G., WESELAK W.: *Raumakustik VO, Version 3.0*. TU Graz, Institut für Breitbandkommunikation, SS 2004
- [SCHOE] SCHÖNHOLTZ F.: *Schalltechnische Grundlagen*. Bad Hersfeld, online auf <http://www.tlt.de/dateien/193.pdf>, aufgerufen am 10.10.2010
- [SUR] FASSOLD W., VERES E.: *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*. Verlag für Bauwesen, Berlin, 2003
- [TDT] JECKLIN J.: *Theorie der Tontechnik*. Universität für Musik und darstellende Kunst Wien, Institut für Elektroakustik. Abschnitt: Schallfeld und Schallfeldgrößen, Wien, 8/2002
- [WEI] WEINZIERL S.: *Handbuch der Audiotechnik*. Springer Verlag, Berlin, 2008