Fachgebiet Audiokommunikation

Audio communication group



Masterarbeit

Planung eines Aufführungsraums für Orgelkonzerte

cand. M.Sc. Holger Struchholz

Studiengang: Audiokommunikation und -technologie

Erstgutachter: Prof. Dr. Stefan Weinzierl Zweitgutachter: Prof. Dr. Wolfgang Ahnert

erstellt: 3. November 2010 abgegeben: 4. November 2010

Technische Universität Berlin, Fakultät I Institut für Sprache und Kommunikation, Fachgebiet Audiokommunikation Berlin, 2010

Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass die vorliegende Masterarbeit zum Thema: "Planung eines Aufführungsraums für Orgelkonzerte" selbstständig von mir bearbeitet und verfasst wurde. Es wurden keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Diese Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Berlin, 3. November 2010

Danksagung

Ich möchte hiermit allen danken, die durch ihre Unterstützung zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Zunächst möchte ich Herrn Prof. Dr. Wolfgang Ahnert für seine Unterstützung und die Möglichkeit danken, die vorliegende Arbeit in Zusammenarbeit mit der Firma ADA Acoustic Design Ahnert durchführen zu können. Mein Dank gilt auch allen Mitarbeitern von ADA, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Tobias Behrens und Herrn Dipl.-Ing. Jörn Hoffmeier, die mir bei Fragen und Problemen mit Rat und Tat zur Seite standen.

Für seine Unterstützung möchte ich mich auch bei meinem betreuenden Professor Herrn Prof. Dr. Stefan Weinzierl bedanken.

Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle auch meinen Eltern sowie meiner Freundin Julia Schneider für das entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung während des gesamten Studiums und während der Erstellung meiner Masterarbeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Einl	eitung	und Fragestellung	1	
	1.1	Projel	ktbeschreibung	2	
		1.1.1	Beschreibung des Rohbaus	4	
		1.1.2	Beschreibung der geplanten Orgel	6	
		1.1.3	Ausgangsgestalt	7	
	1.2	Anfor	derungen an den Orgel-Konzertsaal	9	
		1.2.1	Relevante akustische Größen	10	
		1.2.2	Primärstruktur	17	
		1.2.3	Sekundärstrukur	20	
2	Raumakustische Simulationen am Computer				
	2.1	Verwe	endete Software	27	
	2.2	Berecl	hnungsverfahren	31	
		2.2.1	Allgemeine Prinzipien	31	
		2.2.2	Berechnungsverfahren in EASE	34	
3	Umsetzung				
	3.1	Simula	ationsergebnisse im Erstentwurf	41	
	3.2	2 Eigener Entwurf			
		3.2.1	Maßnahmen Primärstruktur	45	
		3.2.2	Maßnahmen Sekundärstruktur	49	
	3.3	Verifizieren des Entwurfs durch Computersimulation			
		3.3.1	EASE-Modell	54	
		3.3.2	Raumakustische Simulationen im Modell	58	
		3.3.3	Simulationsergebnisse	61	
4	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse und Fazit				
	4.1	Zusan	nmenfassung der Simulationsergebnisse	69	
	4.2	Fazit		70	
Ał	obildu	ingsver	zeichnis	74	
Та	Tabellenverzeichnis				
Lit	Literaturverzeichnis				

1 Einleitung und Fragestellung

In Räumen, die ausschließlich für Musik- und Sprachdarbietungen genutzt werden, bedarf die Hörsamkeit einer genauen akustischen Planung. Die konkreten akustischen Anforderungen eines Raumes ergeben sich hierbei aus dem jeweiligen Nutzungsprofil und lassen sich mittels physikalischer und akustischer Größen genau formulieren. Um die ausreichend gute Hörsamkeit eines Raumes sicherzustellen, kann gezielt auf verschiedene Raumparameter Einfluss genommen werden. Der Umfang und die Art der Einflussnahme ist unter anderem davon abhängig, in welchem Baustadium mit der akustischen Planung begonnen wird.

In meiner Masterarbeit beschäftige ich mich mit der raumakustischen Planung eines Konzertsaals, der primär für Orgelkonzerte genutzt werden soll. Traditionell finden Orgelkonzerte in Sakralbauten statt. Diese haben aufgrund ihrer großzügigen Bauform und der überwiegend schallharten Wände ein sehr spezielles akustisches Profil. Thema des ersten, theoretischen Teils der Arbeit ist es, die akustischen Anforderungen und Parameter eines Orgel-Konzertsaals auf Grundlage bestehender Untersuchungen und in der Literatur beschriebener akustischer Eigenschaften von Sakralsälen und klassischen Konzertsälen abzuleiten und zu spezifizieren.

Die anschließende praktische raumakustische Planung des Konzertsaals geschieht mit Hilfe des akustischen Simulationsprogramms EASE der Firma Software Design Ahnert GmbH [SDA]. Mit EASE können die durchgeführten raumakustische Maßnahmen anhand eines 3D-Computermodells simuliert und verifiziert werden.

Die Masterarbeit führe ich in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro ADA Acoustic Design Ahnert [ADA] durch. Im Rahmen der Masterarbeit werde ich die raumakustische Planung des neu gebauten Orgel-Konzertsaals der Philharmonie Charkow dokumentieren und mittels computergestützter akustischer Simulationen verifizieren.

In Kapitel 1 der vorliegenden Arbeit wird zunächst das konkrete Projekt beschrieben und die aktuelle Sachlage kurz dargestellt. Anschließend werden die relevanten raumakustischen Parameter und Kriterien vorgestellt und konkrete Anforderungen an diese formuliert. Kapitel 2 beschäftigt sich mit raumakustischen Simulationen anhand von Computermodellen. Die in dieser Arbeit verwendete Software wird beschrieben und Grundlagen über die verwendeten Berechnungsverfahren erläutert. Zusätzlich wird kurz darauf eingegangen, wie die durch Simulation gewonnenen Ergebnisse zu bewerten sind und welche Güte diese haben. In Kapitel 3 werden zunächst die Ergebnisse der raumakustischen Untersuchungen im Erstentwurf des Orgel-Konzertsaals diskutiert. Danach wird der selbst entworfene Designentwurf ausführlich vorgestellt und die Simulationsergebnisse dargelegt und diskutiert. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Arbeit kurz zusammengefasst.

1.1 Projektbeschreibung

Das Ingenieurbüro ADA ist vom Gemeindebetrieb "Charkow Regional Philharmonie" beauftragt, im Rahmen der Baumaßnahme "Philharmonie Charkow" den Schallschutz im Inneren des Gebäudes zu untersuchen und das gesamte Gebäude auf raum- und bauakustische Erfordernisse hin zu beurteilen.

Der Gebäudekomplex der Philharmonie Charkow umfasst sowohl historische Gebäudeteile, die zurzeit saniert werden, wie auch neu gebaute oder im Bau befindliche Gebäudeteile. Unter anderem besteht der Gebäudekomplex aus einem historischen Konzertsaal, einem Kammermusiksaal, einem Konzertsaal für Orgelkonzerte, einem großzügigen Foyer, Proberäumen, tontechnischen Studioräumen und diversen Arbeits- und Büroräumen. [Ahn09] Die Abbildungen 1.1 und 1.2 zeigen gerenderte Außenansichten des geplanten Gebäudekomplexes.



Abbildung 1.1: Geplanter Gebäudekomplex, gerenderte Außenansicht



Abbildung 1.2: Geplanter Gebäudekomplex, gerenderte Außenansicht

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit der akustischen Planung des bereits gebauten Orgel-Konzertsaals. Hierfür stellte die "Philharmonie Charkow" innenarchitektonische Entwürfe des Architekten Michael S. Rabinowitsch zur Verfügung. Diese wurden zunächst auf eine dem Nutzungsprofil entsprechende Raumakustik und Hörsamkeit geprüft.

Da diese Entwürfe den Vorstellungen eines Konzertsaals zur Wiedergabe von Orgelkonzerten nicht entsprachen, wurde ein neuer raumakustischer Entwurf für den Saal entwickelt. Auf der Basis des neu entwickelten akustischen Prinzipentwurfs erarbeitete das Architekturbüro gmp [gmp] einen innenarchitektonischen Designentwurf, der in Kapitel 3.2 näher vorgestellt wird. Die Designentwürfe der diskutierten Innenausbauten wurden entweder als 3D-SketchUp-Modell [Goo] oder als AutoCAD-Datei [Aut] zur Verfügung gestellt. Auf Grundlage dieser Daten wurden mit EASE 3D-Computermodelle erstellt, in denen raumakustische Simulationen durchgeführt wurden.

Da der Rohbau des geplanten Orgel-Konzertsaals bereits gebaut wurde und damit einen unveränderlichen Parameter darstellt, bilden dessen Abmessungen in allen Entwürfen und Überlegungen den äußeren Rahmen. Kapitel 1.1.1 beschreibt den Rohbau in allen relevanten Einzelheiten.

Neben den in Kapitel 1.2 ausführlich diskutierten raumakustischen Anforderungen an den Orgel-Konzertsaal gibt es zusätzliche Anforderungen des Auftraggebers, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Ausgestaltung des Innenraums haben. So soll der Orgel-Konzertsaal Sitzplätze für ca. 550 Zuschauer bieten. Die sich hieraus ergebende Sitzplatzfläche macht einen Balkon im Saal zwingend erforderlich. Der Bühnenbereich des Saales muss Raum für einen Chor und ein klassisches Orchester bieten. Für die Haustechnik wie z.B. Belüftungsschächte, Kabelschächte etc. sind zwischen Außenwand und Innenwand des Saales ausreichend Freiräume einzuplanen; im Deckenbereich ist über der Innendecke zusätzlicher Raum für Beleuchtungsbrücken zu beachten. Im hinteren Bereich des Saales ist beim Entwurf ein geschlossener Raum einzuplanen, der als Tonregie und kleines Aufnahmestudio verwendet werden kann.

1.1.1 Beschreibung des Rohbaus

Da der Rohbau des geplanten Orgel-Konzertsaals der Philharmonie Charkow bereits fertig gestellt wurde, bildet dieser als unveränderliche Größe die äußere Hülle für alle raumakustischen Planungen und bedarf deshalb einer genauen Beschreibung. In den Abbildungen der AutoCAD-Pläne 1.3 und 1.4 lassen sich der Grundriss und der Längsschnitt des Konzertsaals gut erkennen. Der ebenfalls eingezeichnete Innenaufbau ist veraltet und wurde verworfen.



Abbildung 1.3: Rohbau, Grundriss

Die Länge des Konzertsaals beträgt ca. 36 m, die Breite des Saales beträgt im Zuschauerbereich ca. 20 m; im Bühnenbereich verjüngt sich die Saalbreite etwas und beträgt noch ca. 17 m. In der Abbildung des Querschnitts ist die auffällige Treppenstruktur des Daches zu erkennen. Die Deckenhöhe verringert sich stufenweise von ca. 20 m auf ca. 15 m. Der Zuschauerbereich steigt von der Vorderkante der Bühne bis auf ca. 2 m an. Vor dem Zuschauerbereich befindet sich der ca. 0,7 m erhöhte, ca. 140 m² große Bühnenbereich, auf dem bei Bedarf ein kleines Orchester Platz findet. Der Balkon, auf dem die Orgel ihren Platz finden soll, ist bereits gebaut; der Balkon im Zuschauerbereich wurde noch nicht gebaut und ist daher frei planbar.



Abbildung 1.4: Rohbau, Längsschnitt

Zum Abschätzen des Rohbauvolumens wurde mit der Software EASE 4.3 ein einfaches Modell des Rohbaus konstruiert. Die Abbildung 1.5 zeigt dieses in verschiedenen Ansichten. Das so bestimmte Gesamtvolumen im Rohbau beträgt ca. 12000 m³. Da zwischen der Außenwand des Rohbaus und der noch zu bauenden Innenwand genügend Raum für technische Einbauten einzuplanen ist, wird im endgültigen Entwurf mit einer geringeren Volumenanzahl zu rechnen sein.



Abbildung 1.5: Rohbau, einfaches EASE-Modell

Durch die Formgebung des Rohbaus ist die Primärstruktur des Orgelkonzertsaals zumindest teilweise vorgegeben. Kritisch kann hier die treppenförmige Gestaltung der Decke gesehen werden, die neben ggf. auftretenden ungewollten Reflexionen auch zu einer großen Volumenreduktion führt.

1.1.2 Beschreibung der geplanten Orgel

Die Abbildung 1.6 zeigt ein 3D-Modell der Orgel, die im geplanten Orgel-Konzertsaal in Charkow installiert werden soll. Gebaut wird die Orgel von dem in Potsdam ansässigen Orgelbau-Unternehmen Alexander Schuke Potsdam-Orgelbau GmbH [Sch]. Der Orgelkasten ist 10,2 m breit, 10,7 m hoch und hat eine Tiefe von 5 m; die Orgel hat 70 Register und 4 Manuale. Die endgültige Gestaltung des Orgelprospektes steht zum derzeitigen Zeitpunkt (August 2010) noch nicht fest. Die in der Abbildung 1.6 zu sehenden Verzierungen an der Frontseite der Orgel sind noch beispielhaft und nicht endgültig festgelegt.

Bezüglich des Schallabstrahlverhaltens der Orgel kann man generell zwischen den Prospektpfeifen und den Orgelpfeifen im Inneren der Orgel unterscheiden. Die Prospektpfeifen strahlen den Schall direkt in den Raum ab, der Schall der Pfeifen im Inneren der Orgel wird durch die Öffnungen zwischen den Prospektpfeifen in den Raum abgestrahlt. Zusammengefasst strahlt die Orgel ein Schallfeld ab, das in der Horizontalen zur Seite hin schwächer wird und in der Vertikalen in einem weiten Winkelbereich annähernd gleich bleibt. [Mei03, S.79]

Die geplante Position der Orgel auf dem bereits gebauten Balkon an der Frontseite des Orgel-Konzertsaals deckt sich mit dem in [Zor76] und [Mei03, S.249] angegebenen optimalen Standort für eine Orgel in einem Sakralbau bzw. Konzertsaal. Die Höhe der

Empore bzw. des Balkons sollte hierbei ca. $\frac{1}{3}$ der Saalhöhe betragen. Über der Orgel sollte jedoch ein freier Luftraum von mindestens 1,5 m eingeplant werden. Aus dieser Position kann die Orgel den Zuschauerbereich direkt und von vorne beschallen.



Abbildung 1.6: Geplante Orgel, SketchUp-Modell

Erwähnt werden muss noch die schallabsorbierende Wirkung der Orgel selber. Wie in [Zor76] und [Mei03, S.27] beschrieben und näher ausgeführt, ist das Orgelgehäuse, sofern es frei im Raum steht, aufgrund des hohlen Aufbaus als Tiefenabsorber wirksam. Die Prospektöffnungen bzw. das Innere der Orgel wirken für auftreffenden Schall ebenfalls hochgradig absorbierend. Hier kann im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 4000 Hz mit einem Absorptionsgrad von ca. 0,5 ausgegangen werden.

1.1.3 Ausgangsgestalt

Die Abbildungen 1.7 und 1.8 zeigen den Erstentwurf des Architekten Michael S. Rabinowitsch als 3D-SketchUp-Modell. Auffallend ist, dass in dem existierenden Rohbau ein komplexer Innenraumaufbau durchgeführt wurde, der das Volumen des Saales stark verringert. Deutlich wird dies, wenn man, wie in Abbildung 1.9, die in EASE angefertigten Modelle des Rohbaus und des Entwurfs übereinander legt.

Die Decke des Saales ist mit durchschnittlich ca. 3-4 m großzügig abgehängt. Auch die seitlichen Einbauten und der Balkon weisen eine deutliche Einbautiefe zwischen ca. 2 m und ca. 4 m auf. Der im hinteren Zuschauerbereich vorgesehene Tonregieraum ist mit seinen Abmessungen sehr großzügig ausgelegt. Durch diese Maßnahmen verringert sich das Volumen des Saales auf ca. 6600 m³.

8 1 Einleitung und Fragestellung



Abbildung 1.7: Erstentwurf des Orgel-Konzertsaals, Schnittperspektive



 ${\bf Abbildung \ 1.8:} \ {\rm Erstentwurf \ des \ Orgel-Konzertsaals, \ Blick \ auf \ die \ Orgel$



Abbildung 1.9: Erstentwurf des Orgel-Konzertsaals (gelb) und Rohbau (schwarz), Volumenvergleich

1.2 Anforderungen an den Orgel-Konzertsaal

Die akustischen Anforderungen eines Raumes ergeben sich aus dem jeweiligen Nutzungsprofil. Um die akustischen Eigenschaften eines Raumes an das Nutzungsprofil anzupassen, kann durch gezielte raumakustische Maßnahmen auf die Hörsamkeit eines Raumes Einfluss genommen werden. Das hier vorgestellte Nutzungsprofil stellt, wie in der Einleitung bereits kurz angesprochen, deshalb eine Besonderheit dar, da der Orgel-Konzertsaal in Charkow vornehmlich für die Aufführung von Orgelmusik genutzt werden wird.

Konzertorgeln, die in klassischen Konzertsälen installiert sind, finden dort in der Regel keine optimalen akustischen Bedingungen vor; die Räumlichkeiten sind auf die Aufführung von klassischer Orchestermusik ausgerichtet. Durch die unterschiedlichen akustischen Anforderungen von klassischer Orchestermusik und Orgelmusik stellen solche Räume also im besten Fall einen Kompromiss beider Nutzungsprofile dar. Aufgrund der primären Ausrichtung auf Orgelmusik kann sich die Hörsamkeit im Orgel-Konzertsaal Charkow eindeutig an den Anforderungen für Orgelmusik orientieren. Da diese klassischerweise in Sakralbauten aufgeführt wird, kann sich auch das vorgestellte akustischen Profil deutlich an der Hörsamkeit von Sakralbauten orientieren.

Im folgenden Kapitel 1.2.1 werden zunächst die akustischen Bewertungskriterien vorgestellt, anhand derer das Nutzungsprofil Orgel-Konzertsaal definiert werden kann. Danach werden in den Kapiteln 1.2.2 und 1.2.3 die Raumparameter bzw. die Maßnahmen diskutiert, mit deren Hilfe man auf die akustischen Eigenschaften des geplanten Orgel-Konzertsaals Einfluss nehmen kann.

1.2.1 Relevante akustische Größen

Nachhallzeit

Wenn man davon ausgeht, dass sich die Hörsamkeit des geplanten Orgel-Konzertsaals an der Hörsamkeit eines Sakralbaus orientiert, ist mit Sicherheit die Nachhallzeit des Raumes das auffälligste und ausschlaggebendste akustische Kriterium. Unter der Nachhallzeit versteht man die Zeitspanne, innerhalb derer der Schallpegel nach plötzlichem Aufhören einer akustischen Anregung von seinem ursprünglichen Wert um 60 dB absinkt. Die Nachhallzeit ist eine frequenzabhängige Größe; wird ein Einzahlwert angegeben, so ist dies in der Regel der Mittelwert der Nachhallzeiten bei 500 Hz und 1000 Hz Oktavmittenfrequenz. Die Nachhallzeit ist im Wesentlichen vom Raumvolumen und den schallabsorbierenden Eigenschaften der Raumoberflächen abhängig. [Ahn08, S.188] In [Bor05b] wird der kleinste wahrnehmbare Unterschied der Nachhallzeit mit 50 ms angegeben.

Das Raumklangerlebnis in einem Raum ist von der Länge der Nachhallzeit abhängig. Ist die Nachhallzeit zu kurz, wird ein Raum oft als zu "trocken" empfunden, das Klangbild ist zu klar und fällt auseinander. Ist die Nachhallzeit zu lang, wird das Klangbild zunehmend verwaschener und das musikalische Geschehen lässt sich immer schwerer verfolgen. Die richtige und ausreichend lange Nachhallzeit für einen Raum ist neben den musikalischen Anforderungen immer auch von den traditionell geprägten Hörgewohnheiten und -erwartungen der Zuhörer abhängig. In [Mei03, S.47] und [Zor76] finden sich ausführliche Beschreibungen der musikalischen Wirkung der Nachhallzeit in Sakralbauten.

Die Abbildung 1.10 zeigt die anzustrebenden Nachhallzeiten für verschiedene Nutzungsprofile in Abhängigkeit des Raumvolumens. Bei einem geschätzten Raumvolumen (Rohbauvolumen, abzüglich der Volumen aller Einbauten) des Orgel-Konzertsaals von ca. 8000 – 9000 m³ liegt die Zielnachhallzeit für Orgelmusik also bei ca. 2,6 s. Ein ähnlicher Wert von > 2,5 s für Orgelkonzerte ist in [Bar10, S.30] zu finden.

Betrachtet man die Literatur, die sich mit der Akustik und der Hörsamkeit in Sakralbauten auseinandersetzt, so liegen die gemessenen Werte für die Nachhallzeiten bei einem Raumvolumen von ca. $8000 - 9000 \text{ m}^3$ bei ca. 4,5 - 6 s. Die Abbildungen 1.11, 1.12 und 1.13 geben eine Übersicht über die in Kirchen verschiedener Epochen gemessenen mittleren Nachhallzeiten in Abhängigkeit des jeweiligen Gebäudevolumens.

Die Abbildung 1.14 zeigt die in [Zor76] vorgestellten und aus Messungen abgeleiteten Streubereiche für eine anzustrebende, optimale Nachhallzeit in Abhängigkeit des Volumens und der Nutzungsprofile Sprache und Kirchenmusik. Im interessierenden Volumenbereich von $8000 - 9000 \text{ m}^3$ liegen die Werte der Nachhallzeit bei etwa 2,4 – 3,2 s.



Abbildung 1.10: Empfohlene Nachhallzeit in Abhängigkeit von Volumen und Nutzungsprofil



Abbildung 1.11: Nachhallzeiten bei mittleren Frequenzen in gotischen Kirchen in Abhängigkeit vom Raumvolumen [Mei03, S.95]



Abbildung 1.12: Nachhallzeiten bei mittleren Frequenzen in neugotischen Kirchen in Abhängigkeit vom Raumvolumen [Mei03, S.123]



Abbildung 1.13: Nachhallzeiten bei mittleren Frequenzen in Barockkirchen in Abhängigkeit vom Raumvolumen [Mei03, S.115]



Abbildung 1.14: Empfohlene Nachhallzeiten in Abhängigkeit vom Raumvolumen [Zor76]

Die Abbildungen 1.15 und 1.16 geben eine Übersicht über die in [Mei03, S.144] empfohlenen Nachhallzeiten in besetztem und unbesetztem Zustand. Die unterschiedlichen Werte ergeben sich aus der unterschiedlichen Gewichtung der beiden für Kirchen typischen Nutzungsprofile Sprache (Gottesdienst) und Orgelmusik bzw. Messe. Die optimale Nachhallzeit für eine gute Sprachverständlichkeit liegt, wie in den Bildern 1.10 und 1.14 zu sehen, deutlich unter den Nachhallzeiten für Musikdarbietungen.



Abbildung 1.15: Empfohlene Nachhallzeiten in besetzten Kirchen in Abhängigkeit vom Raumvolumen. CM: Cremer u. Müller, Z: Zorkoczy, KZ: Kaufmann u. Zemke, KH: Knudsen u. Harris [Mei03, S.144]

Cremer und Müller orientieren sich in [Cre78] bei der empfohlenen Nachhallzeit an den Nachhallzeiten, die in Orchester-Konzertsälen als ideal angesehen werden. Diese liegt, wie in der Abbildung 1.15 zu sehen, im interessierenden Volumenbereich bei ca. 1,8 - 2,5 s. Knudsen und Harris gehen in [Knu50] bei der empfohlenen Nachhallzeit von 1,5 - 1,9 s von einer vorrangigen Sprachnutzung der Kirche aus und setzen die Nachhallzeit entsprechend

14 1 Einleitung und Fragestellung

eher tief an. Zorcoczy fordert in [Zor76] dagegen eine deutlich höhere Nachhallzeit, die sich mit 2,4-3,2 s vorrangig an der musikalischen Klangwirkung orientiert. Wie auch bei den pauschal empfohlenen ca. 2,7 s von Kaufmann und Zemke [Kau69] basiert die Empfehlung auf Äußerungen von Kirchenmusikern, Orgelbauern und Tonmeistern. Die in Abbildung 1.16 zu sehenden Werte von Hartmann [Har82] beruhen auf der Beurteilung der jeweiligen Kirchenräume durch den Pfarrer, Kirchenmusiker und Gemeindemitglieder. [Mei03, S.144]



Abbildung 1.16: Empfohlene Nachhallzeiten in unbesetzten Kirchen in Abhängigkeit vom Raumvolumen. CM: Cremer u. Müller, H: Hartmann, KZ: Kaufmann u. Zemke [Mei03, S.145]

Betrachtet man neben den genannten Einzahlwerten, die sich auf mittlere Frequenzanteile beziehen, den gesamten Frequenzgang der Nachhallzeit, so lässt sich zusammenfassend sagen, dass für Orgelmusik insbesondere eine zu tiefen Frequenzen hin gleich bleibende oder nur schwach absinkende Nachhallzeit empfohlen wird. Dies garantiert einen vollen und ausgewogenen Gesamtklang der Orgel im Raum. [Mei03, S.145]

Orientiert man sich bei der Hörsamkeit des geplanten Orgel-Konzertsaal also an den Empfehlungen, die für Orgelmusik in Sakralbauten angegeben werden, so ist bei einem geschätzten Volumen von $8000 - 9000 \text{ m}^3$ ein Zielwert für die Nachhallzeit von ca. 2,5 - 3,2 s anzustreben.

Dieser Wertebereich deckt sich mit dem von der Firma Alexander Schuke Potsdam-Orgelbau GmbH empfohlenen Wert für die Nachhallzeit. Auf Nachfrage wurde von der Firma Schuke als wichtigstes und primäres raumakustisches Kriterium für eine optimale Hörsamkeit für Orgelkonzerte eine hohe anzustrebende Nachhallzeit von ca. 3 s angegeben. Die Abbildung 1.17 zeigt die anzustrebende mittlere Nachhallzeit inklusive eines standardisierten Toleranzbereiches von 20% in einer Grafik. Inwieweit dies im geplanten Orgel-Konzertsaal Charkow realisiert werden kann, wird an späterer Stelle diskutiert werden müssen.



Abbildung 1.17: Anzustrebende Nachhallzeit

C80

C-Berechnungen bieten die Möglichkeiten, die akustische Wirkung eines Raumes zu bewerten. In dB wird das Verhältnis aus Direkt- und Raumschall unter der Verwendung einer bestimmten Trennzeit berechnet. [Rei75] Bei dem Klarheitmaß C80 wird das Verhältnis aus der Schallenergie, die in den ersten 80 ms eintrifft, und der restlichen Schallenergie gebildet. C80 bewertet die Klarheit bzw. zeitliche Durchsichtigkeit von Musikdarbietungen und basiert auf der Annahme, dass die Reflexionen, die innerhalb von 80 ms auf den Direktschall folgen, die Klarheit einer musikalischen Darbietung unterstützen, während die später eintreffenden Reflexionen und der Nachhall die Klarheit verringern. Mit ansteigender Nachhallzeit fällt also der Wert für C80; durch den stärker werdenden Raumeindruck hat der Zuhörer zunehmend das Gefühl, von der Musik eingehüllt zu sein. [Mei03, S.50]

Wird von C80 ein Einzahlwert angegeben, so berechnet er sich aus dem Mittelwert der 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz Oktavbänder. [Ber96, S.470] Der kleinste wahrnehmbare Unterschied für das Klarheitsmaß C80 liegt nach Höhne und Schroth [Höh95] bei ca. ± 3 dB. In [Bor05b] wird als differentielle Wahrnehmungsschwelle hingegen ± 1 dB angegeben.

In der Literatur werden für das Klarheitsmaß für den Nutzungsfall klassisches Konzert (2 ± 2) dB [Ahn00], > -1.6 dB [Ahn08, S.199], zwischen -2 dB und 1 dB [Mei03, S.53] und (0 ± 2) dB [Bar10, S.67] empfohlen. In [Ahn00] werden Orgelkonzerte in Konzertsälen gesondert erwähnt; empfohlen wird für diesen Fall ein Wert von (0 ± 2) dB.

Durch die längeren Nachhallzeiten in Sakralbauten ist der Raumschallanteil im Vergleich zu Konzertsälen höher. Da im Vergleich mehr Schallenergie nach der Trennzeit von 80 ms beim Empfänger eintrifft, bedingt dies insgesamt niedrigere Werte für C80. Für eine musikalisch stimmige Hörsamkeit in Sakralbauten werden in [Ahn08, S.199] Werte von > -5 dB und in [Mei03, S.53] > -6 dB angegeben.

Möchte man sich bei der Hörsamkeit des geplanten Orgel-Konzertsaals also an Sakralbauten orientieren, kann man zusammenfassend einen C80-Wert von (-2 ± 2) dB anstreben.

Echofreiheit, Diffusität und Räumlichkeit des Schallfeldes

Ziel einer erfolgreichen Beschallung sollte es sein, den Zuhörer möglichst gleichförmig mit Schall zu versorgen. Das Schallfeld im Raum sollte also möglichst aus dem Direktschall und einem dichten, aus Reflexionen aller Richtungen zusammengesetzten, diffusen Schallfeld bestehen. [Zor76]

In [Mei03, S.48] und in [Bar10, S.53] wird sowohl bei Konzertsälen wie auch Sakralbauten auf die positiven Effekte eines gleichmäßigen und diffusen Schallfeldes hingewiesen. Ein gerade in Sakralbauten üblicher Effekt ist, dass sich bei großen Lautstärken der Raum mit Schall zu füllen scheint und der Hörer vom Klang eingehüllt wird.

Als geeignetes akustisches Maß zur Beschreibung dieses Effekts kann das Raumeindrucksmaß R nach Kuhl [Kuh78] und Lehmann [Leh74] herangezogen werden. Das in dB angegebene Maß setzt sich aus den Parametern Räumlichkeit und Halligkeit zusammen. Raumeindrucksmaße zwischen -5 dB und -10 dB werden als wenig räumlich, solche von 1 dB bis 7 dB als sehr räumlich bezeichnet.

Störend werden energiereiche Spätreflexionen, also Echoeffekte, wahrgenommen. Reflexionen, die innerhalb von ca. 50 ms auf den Direktschall folgen, werden quasi zeitlich integriert und unterstützen den Lautstärkeeindruck eines Signals. Folgen die Reflexionen später als 50 ms auf den Direktschall, werden sie vom Ohr subjektiv als getrenntes Signal, als Echo wahrgenommen. Anhand eines Reflektogramms oder einer Impulsantwort kann die zeitliche Struktur und Zusammensetzung des Schallfeldes anschaulich untersucht werden. Die Reflexionen sollten möglichst gleichmäßig und dicht beim Hörer eintreffen; energiereiche Spätreflexionen (Δ t>50 ms) sind zu vermeiden. [Ahn08, S.197]

Ein Maß zum Bewerten von Echoeffekten in einem Raum ist das Echokriterium nach Dietsch und Kraak [Die86]. Durch die Anwendung einer Gewichtungsfunktion auf die Energie-Zeitkurve können störende Echos aus berechneten Reflektogrammen sichtbar gemacht werden. Für Musik sind Werte größer als 2 problematisch; Werte über 1,5 liegen im Grenzbereich. Anzustreben sind also Werte, die unter der kritischen Grenze von 1,5 liegen.

Werden verschiedene raumakustische Kriterien an verschiedenen Stellen in einem Raum bestimmt, so können daraus Rückschlüsse auf die Diffusität des Schallfeldes geschlossen werden. Weisen die gemessenen Kriterien nur eine geringe Varianz auf, so ist dies ein Hinweis, dass im untersuchten Raum ein gleichmäßiges und diffuses Schallfeld anzutreffen ist. Eine starke Varianz der Kriterien an verschiedenen Messorten im Raum ist ein Indiz für ein ungleichmäßiges Schallfeld und ggf. auftretende, störende Schallkonzentrationen. Da für den geplanten Orgel-Konzertsaal ein möglichst diffuses Schallfeld gefordert wird, sollten die untersuchten raumakustischen Kriterien über den gesamten Raum möglichst konstant sein.

1.2.2 Primärstruktur

Die Primärstruktur eines Raumes, also fundamentale Raumparameter wie Volumen und Raumform, geben bereits eine gewisse Klangstruktur eines Raumes vor. Da der Rohbau des geplanten Orgel-Konzertsaals schon fertig gestellt wurde, sind die Grenzen der Gestaltungsmöglichkeiten klar vorgegeben. Zusätzlich müssen bei der Ausgestaltung die anfänglich in 1.1 genannten Anforderungen des Auftraggebers ihre Beachtung finden.

Volumenkennzahl

Da der typische hallige Klangeindruck in Sakralbauten maßgeblich vom großen Volumen der Räume geprägt ist, muss auch im geplanten Orgel-Konzertsaal ein möglichst hohes aktives Saalvolumen gefordert und bereitgestellt werden.

Als Maßzahl für das Volumen von Räumen wird in der Literatur die Volumenkennzahl k verwendet; sie beschreibt das Verhältnis aus aktivem Raumvolumen pro Zuschauerplatz. Als geeignete Richtwerte werden für Konzertsäle in [Ahn08, S.209] 7 – 12 m³ und in [Bar10, S.31] > 10 m³ angegeben. Für Sakralbauten liegen die empfohlenen Werte durchschnittlich etwas höher bei 8 – 10 m³ [Zor76], 10 – 14 m³ [Ahn08, S.209] und > 10 m³ [Mei03, S.215]. Das Ausgangsvolumen des Rohbaus beträgt wie in 1.1.1 beschrieben ca. 1200 m³. Für eine erste Schätzung des Volumens wurden in einem einfaches EASE-Modell die Anforderungen des Auftraggebers vereinfacht umgesetzt:

- Verminderung der Saalbreite um 3 m (jeweils 1,5 m an jeder Wand) zum Einbau technischer Einrichtungen wie Belüftungsschächte, Kabelkanäle etc.
- Versetzen der Rückwand um 1,5 m zum Einbau technischer Einrichtungen
- Abhängen der Decke 1 m unter den Trägern (Beibehalten der treppenförmigen Deckenstufung)
- Einbau eines Balkons im Zuschauerbereich
- Einbau der Orgel
- Einbau einer kleinen Tonregie unter dem Balkon

Durch diese grob dimensionierten Maßnahmen vermindert sich das Volumen des Raumes auf ca. 8500 m³. Bei den geforderten 550 Zuschauern ergibt sich in dieser ersten Abschätzung eine Volumenkennzahl von 15 m³. Dieser Wert liegt an der oberen Grenze der empfohlenen Werte und lässt somit Spielraum bei der genaueren Planung der Maßnahmen.

Raumform

Da auch die Raumform durch den bereits bestehenden Grundriss vorgegeben ist, wird an dieser Stelle nur der gegebene rechteckige Grundriss eines Konzertsaals diskutiert. Informationen zu den Eigenschaften weiterer Saalformen finden sich in der einschlägigen Literatur.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass rechteckige Grundrisse mit der Darbietungszone an der Stirnseite eines Raumes akustisch günstig sind und sich in der Praxis bewährt haben. Der Direktschall und energiereiche Anfangsreflexionen der seitlichen Wände können den Zuschauerbereich ungehindert beschallen. Zusätzlich begünstigt die rechteckige Saalform mit einer entsprechenden Auflockerung der glatten Begrenzungsflächen das Auftreten vieler diffus streuender Reflexionen, die ein gleichmäßiges und diffuses Schallfeld hervorrufen. Allgemein wird der Klangeindruck in Räumen mit senkrecht zueinander stehenden Begrenzungsflächen in der Literatur (z.B. [Wei08, S.211], [Bar10, S.47]) als eher warm und wenig brillant beschrieben.

Da die parallel stehenden Wände eines Raumes störende Echoeffekte und Flatterechos prinzipiell begünstigen, muss die Entstehung dieser durch entsprechende raumakustische Maßnahmen an der Sekundärstruktur vermieden werden. In Kapitel 1.2.3 werden einige dieser Maßnahmen näher ausgeführt und diskutiert.

Ebenfalls in diesem Kapitel erwähnt werden muss die schon im Rohbau angelegte Sitzreihenüberhöhung im Publikumsbereich. Der nach hinten ansteigende Publikumsbereich ist einer ebenen Anordnung in jedem Fall vorzuziehen. Sowohl aus akustischer Sicht, also ausreichende, ungehinderte Direktschallversorgung und keine Dämpfungseffekte durch Verdeckung wie auch aus optischen Gründen, also freie Sicht auf die Bühne, ist eine solche Anordnung sinnvoll. [Bar10, S.54]

Die bereits im Rohbau angelegte Bühne ist leicht erhöht vor dem Zuschauerbereich platziert. Die Rohbaumaße der Bühnenfläche von 140 m² werden sich durch Verkleidungen der Wand noch etwas reduzieren.

Decke

Da die Decke eines Raumes in der Regel die größte zusammenhängende Fläche darstellt, muss diese gesondert betrachtet werden. Allgemein kann man sagen, dass die Deckenform zur gezielten Schalllenkung und die Deckenhöhe zur Anpassung der Volumenkennzahl verwendet werden kann. Durch eine entsprechende Ausgestaltung kann die Decke auch zur Erhöhung der Nachhallzeit beitragen. Die Deckenform sollte so ausgestaltet sein, dass sie die hinteren Zuschauerbereiche mit günstigen, d.h. direkten Schallreflexionen versorgt. Ungünstig sind monoton gekrümmte Decken, die Schallbündelungseffekte hervorrufen können. [Mei03, S.215] Für Konzertsäle hat sich eine nach hinten abfallende, gestufte Ausformung der Decke bewährt. Beispiele entsprechend geformter Decken sind in der Abbildung 1.18 zu sehen. [Ahn08, S.217]



Abbildung 1.18: Akustisch günstige Ausgestaltung der Decke [Ahn08, S.219]

Bei der Ausgestaltung der Decke muss die bereits bestehende Abstufung der Decke berücksichtigt werden. Eine stufige Ausformung der Decke ist also bereits vorgegeben, die detaillierte Strukturierung wird an späterer Stelle beschrieben werden. Bei der Wahl der Deckenhöhe ist darauf zu achten, dass die geforderte Volumenkennzahl nicht unterschritten wird und genügend Volumen zum Aufbau eines diffusen Nachhalls vorhanden ist. Um den Vorgaben zu genügen, sollte die Decke vermutlich möglichst dicht unter den Trägern des Rohbaus angebracht werden. Die empfohlene Deckenhöhe für einen Konzertsaal wird in [Ahn08, S.219] mit 5 – 12 m angegeben; die Deckenhöhe von Sakralbauten liegt jedoch üblicherweise weit darüber.

Balkon

Grundsätzlich kann man sagen, dass der Einbau von Balkonen aufgrund der breitbandig diffusen schallsteuernden Wirkung einen positiven Effekt auf die Raumakustik hat.

Bei der Planung von Balkonen ist vor allem das Verhältnis aus der Einbautiefe D des Balkons und der Höhe H, also der Öffnung zwischen Balkon und Parkettebene bzw. Balkon und Decke zu beachten. Die beiden Größen sowie der Winkel Θ sind in Abbildung 1.19 anschaulich dargestellt. In [Ahn08, S.220] und in [Bar10, S.54] werden für das Verhältnis von D und H: $\frac{D}{H} < 1$ und für den Winkel Θ mindestens 40° empfohlen.



Abbildung 1.19: Einbautiefe D, Höhe H und Öffnungswinkel Θ für einen Balkon [Bar10, S.56]

1.2.3 Sekundärstrukur

Die Sekundärstruktur eines Raumes bezeichnet im Wesentlichen die Ausgestaltung und den Aufbau der Wand- und Deckenstrukturen und deren Materialbeschaffenheit.

Die durch die Primärstruktur vorgegebene grundlegende Klangstruktur eines Raumes kann durch akustisch wirksame Maßnahmen an der Sekundärstruktur geändert und angepasst werden. Durch die Anordnung und Verteilung frequenzabhängiger schallabsorbierender und schallreflektierender Flächen kann eine dem Nutzungsprofil entsprechende Hörsamkeit in einem Raum erzeugt werden.

In [Mei03] sind die Sekundärstrukturen einiger Kirchen detailliert vorgestellt und diskutiert; Barron [Bar10] und Beranek [Ber03] stellen die akustisch wirksamen Sekundärstrukturen berühmter Konzertsäle vor. Detaillierte Anforderungen lassen sich für die Sekundärstruktur an dieser Stelle nicht formulieren. Die detaillierte Ausformung des Raumes und die Materialbeschaffenheit der Oberflächen werden in Kapitel 3 anhand eines Computermodells zu diskutieren und zu verifizieren sein.

Struktur der Oberflächen

Treffen Schallwellen auf reflektierende Oberflächen, so werden die Schallwellen abhängig von ihrer Wellenlänge und der Ausformung der Struktur der Oberfläche reflektiert. Nur Strukturen, deren Abmessungen größer oder gleich der Wellenlänge sind, reflektieren den Schall bzw. haben einen Einfluss auf die Art der Reflexion. Abbildung 1.20 veranschaulicht den Einfluss der Abmessungen b der Strukturen auf die Reflexion der Schallwellen in Abhängigkeit der Wellenlänge λ . [Ahn08, S.227]



Abbildung 1.20: Schallreflexionen an ebenen Flächen mit Oberflächenstruktur [Wei08, S.227]

Als Maß zur Beschreibung der Diffusität von Reflexionen auf unebenen Oberflächen wird der frequenzabhängige Streugrad s (Scattering coefficient) nach ISO 17497-1 verwendet. Er ist definiert als das Verhältnis der nicht geometrisch, sondern diffus reflektierten Schallenergie zur gesamten reflektierten Schallenergie. [Ahn08, S.232]

Um die Voraussetzungen für ein breitbandig diffuses Schallfeld zu schaffen, müssen die Begrenzungsflächen des Raumes mit Strukturen unterschiedlicher Abmessungen aufgelockert werden. So kann sich durch diffuse Reflexionen tiefer, mittlerer und hoher Frequenzen ein gleichmäßiges Schallfeld aufbauen. Zusätzlich verhindert eine sinnvoll strukturierte Oberflächengestaltung das Auftreten ungewollter Echoeffekte, Flatterechos und Schallkonzentrationen. [Zor76]

In Sakralräumen ist eine solche Strukturierung der Oberflächen in der Regel durch die Ausstattung der Räumlichkeiten mit Stuckierung, Vorsprüngen, Säulen und Verzierungen von vornherein gegeben. Reflektierende Oberflächen werden hier hauptsächlich zur Direktschall unterstützenden Schalllenkung verwendet. [Zor76]

Ähnliches lässt sich für die klassischen, rechteckigen Konzertsäle des 19. Jahrhunderts sagen. Deren verzierte und stark strukturierten Oberflächen sorgen für ein hoch diffuses Schallfeld und somit für eine angenehme Hörsamkeit. Balkone wirken sich in Konzertsälen ebenfalls positiv auf das Schallfeld aus. Mit ihren Abmessungen von mehreren Metern wirken sie im tiefen Frequenzbereich als Diffusoren. [Bar10, S.79]

Um im geplanten Orgel-Konzertsaal ein ausreichend diffuses Schallfeld zu garantieren, ist dafür zu sorgen, dass die Wände und Decken mit periodischen Strukturen unterschiedlicher Abmessungen und Ausrichtungen ausgestattet sind. Hierbei ist darauf zu achten, dass durch eine entsprechende Ausrichtung der Flächen viel Schallenergie in den oberen Bereich des Saales geworfen wird. Dies führt dazu, dass das Nachhallpotenzial des großen Volumens voll ausgeschöpft wird. Größere reflektierende Flächen, die z.B. neben und über einer Bühne angebracht sind, lassen sich zur gezielten Schalllenkung einsetzen. Energiereiche erste Reflexionen können so den Direktschall sinnvoll unterstützen. Der geplante Balkon wird sich, wie bereits angedeutet, positiv auf die Diffusität im unteren Frequenzbereich auswirken.

Materialbeschaffenheit der Oberflächen

Betrachtet man die akustischen Eigenschaften einer Oberfläche, so sind neben der Strukturierung und den resultierenden Effekten bei der Reflexion die schallabsorbierende Wirkung der Oberflächen bzw. Materialien von akustischer Relevanz.

Als Maß für die Schallabsorption eines Materials wird der Schallabsorptionsgrad α verwendet. Der Absorptionsgrad berechnet sich aus dem Verhältnis aus der von einer Fläche absorbierten Schallleistung und der auf die Schallfläche auftreffenden Schallleistung. Je nach Aufbau der absorbierenden Oberfläche unterscheidet man poröse Absorber und Resonanzabsorber. Poröse Absorber sind in der Regel bei mittleren und hohen Frequenzen aktiv, Resonanzabsorber wirken eher im mittleren und tiefen Frequenzbereich. Der Wirkbereich der Materialien und Absorberaufbauten lässt sich durch gezielte Dimensionierung anpassen und manipulieren. Näheres zur Wirkungsweise und dem Aufbau von schallabsorbierenden Anordnungen findet sich in der einschlägigen Fachliteratur wie z.B. [Wei08] und [Mös07]. Besondere Erwähnung muss noch die schallabsorbierende Wirkung von Publikum finden. Sie stellt in vielen Konzertsälen die größte absorbierende Fläche dar. Abhängig von Faktoren wie Besetzungsdichte, Sitzreihenabstand und Art des Gestühls wirken von Publikum besetzte Flächen vor allem als Höhen- und Mittenabsorber. Um die Nachhallzeit und die Hörsamkeit in Räumen unabhängig von der Anzahl der anwesenden Personen zu machen, müssen die Unterschiede der absorbierenden Wirkung zwischen besetztem und unbesetztem Gestühl so klein wie möglich gehalten werden. Dies geschieht in Konzertsälen üblicherweise durch eine entsprechend dicke und damit akustisch aktive Polsterung des Gestühls. [Ahn08, S.238]

In Sakralbauten besteht der überwiegende Teil der Wände und Decken gewöhnlich aus schallharten, d.h. hauptsächlich reflektierenden Materialien. Dadurch ist die Nachhallzeit maßgeblich von der absorbierenden Wirkung des Publikums bestimmt. Da üblicherweise auch das Gestühl entweder nur dünn oder überhaupt nicht gepolstert ist, ist sowohl die Dauer als auch der Frequenzverlauf der Nachhallzeit stark von der Anzahl der anwesenden Personen abhängig. [Mei03, S.217]

Zusammenfassend kann man sagen, dass absorbierende Flächen dazu genutzt werden können, die Hörsamkeit eines Raumes an eine formulierte Vorgabe anzupassen. Da die gegebenen Räumlichkeiten und die Anforderungen an die Hörsamkeit stark variieren, ist es schwierig, allgemeingültige Aussagen zu formulieren. Als Faustregel lässt sich aber sagen, dass im Bühnenbereich eher reflektierende Materialien verwendet werden sollten. Mit einer entsprechenden Ausrichtung der Flächen wird so der Direktschall durch Reflexionen verstärkt. Der Bühne gegenüberliegende Flächen sollten zur Vermeidung direkter Echos (sog. Theaterechos) eher absorbierend sein.

In Hinblick auf den Entwurf des geplanten Orgel-Konzertsaals lassen sich vorab also folgende Punkte benennen. Das Gestühl sollte so beschaffen sein, dass die Unterschiede bzgl. der Absorption im unbesetzten und besetzten Zustand möglichst gering sind. Damit keine Schallenergie verloren geht, sollte die Innenfläche des Saales, insbesondere im Deckenbereich, möglichst geschlossen sein. Um den Direktschall der Orgel zu unterstützen, sollten die Oberflächen um die Orgel reflektierend sein. Insgesamt lässt sich schon abschätzen, dass wie auch in Sakralbauten die Wände und Decken des Orgel-Konzertsaals eher reflektierend als absorbierend sein sollten, um die geforderte Nachhallzeit von ca. 3 s zu ermöglichen.

2 Raumakustische Simulationen am Computer

Um bereits in der Planungsphase eines Gebäudes die Wirkung raumakustischer Maßnahmen zu überprüfen und Aussagen über die Hörsamkeit eines Raumes treffen zu können, werden akustische Vorgänge anhand von Modellen simuliert. Bereits seit den 1930er Jahren werden Untersuchungen in physikalischen Miniatur-Modellen durchgeführt. Mit der fortschreitenden Entwicklung der Computertechnologie werden seit den 1970er Jahren akustische Vorgänge in Räumen vermehrt auch anhand von mathematischen Computermodellen analysiert. [Bar10]

Die Grundlage für spätere raumakustische Untersuchungen am Computer ist immer ein 3D-Modell des zu untersuchenden Raumes. Hierbei werden neben der Geometrie des Raumes auch die Materialbeschaffenheit und damit die akustischen Eigenschaften der Begrenzungsflächen im Modell nachgebildet. Statistische Ergebnisse wie z.B. die Nachhallzeit nach Sabine lassen sich direkt aus den Raumparametern des Modells berechnen. Die Bestimmung weitergehender raumakustischer Kriterien basiert gewöhnlich auf der Berechnung der Raumimpulsantwort. [Ahn08, S.242]

Zur Erzeugung der Raumimpulsantwort gibt es verschiedene Verfahren, die je nach Komplexität des Modells sehr rechen- und damit zeitaufwändig sind. Die Schwierigkeit liegt darin, die sehr aufwändigen physikalischen Berechnungen und Vorgänge so zu vereinfachen, dass die dadurch entstehenden Ungenauigkeiten die Ergebnisse nur minimal und nicht wahrnehmbar verfälschen. In Kapitel 2.2 werden einige dieser Algorithmen näher erläutert. Da noch nicht alle physikalischen Gesichtspunkte der Schallausbreitung mit den Algorithmen der Simulationsprogramme abgebildet werden (können), sind die Ergebnisse dieser Verfahren jedoch nicht immer in allen Details zuverlässig. In [Bar10, S.64], [Ahn08, S.242] und [Vor08, S.213] werden vor allem Beugungseffekte, Diffusität und Interferenzeffekte genannt, die noch nicht zufriedenstellend in die Algorithmen integriert sind.

Mit der Validität computergestützter raumakustischer Simulationen beschäftigt sich die 2005 bereits zum dritten Mal durchgeführte "Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation" [Bor05a], [Bor05b], [Bor02]. In den Ringvergleichen wurden die Ergebnisse unterschiedlicher Simulationssoftwares mit den Ergebnissen realer Messungen verglichen. Um einen Vergleich mit den realen Messungen zu ermöglichen, wurden den Probanden Raumgeometrie, Absorptionsgrade und Streugrade der untersuchten Räume zur Verfügung gestellt. So konnten systematische Simulationsunterschiede durch unterschiedliche Annahmen bezüglich Geometrie und Materialbeschaffenheit von vornherein ausgeschlossen werden.

Die sechs untersuchten kommerziellen Softwarepakete schnitten in den Tests gut ab. Die Unterschiede zwischen Simulation und Messung waren bei den untersuchten raumakustischen Kriterien weitestgehend unterhalb oder im Bereich der Wahrnehmbarkeitsschwelle. Die Tabelle 2.1 zeigt die untersuchten Kriterien und die dazugehörigen differentiellen Wahrnehmbarkeitsschwellen (Just noticeable difference). Die Abbildung 2.1 zeigt den auf die jeweilige Wahrnehmbarkeitsschwelle normierten Fehler bei allen Kriterien und allen untersuchten Softwarepaketen. Wie in den Abbildungen zu sehen, treten vor allem bei der Berechnung der Nachhallzeit T30 relativ große Fehler auf. Diese lassen sich aber, wie in [Bor05b] angemerkt, weitestgehend auf ungenau gemessene und zur Verfügung gestellte Absorptions- und Streugrade zurückführen. In der Untersuchung ebenfalls erwähnt werden die Schwierigkeiten der Berechnungen der unteren Frequenzbereiche (125 Hz Oktavband). Diese Ungenauigkeiten sind vornehmlich auf die von den Programmen verwendete geometrische Raumakustik und die dadurch bedingten fehlenden wellentheoretischen Aspekte der Schallausbreitung zurückzuführen.

Kriterium	JND
T30	$0,05~{ m s}$
EDT	$0,05~{ m s}$
D	5%
С	1 dB
TS	$10 \mathrm{ms}$
G	1 dB
LF, LFC	5%
LACC	0,08

 Tabelle 2.1: Übersicht über die untersuchten Kriterien und die differentiellen Wahrnehmbarkeitsschwellen (JND) [Bor05b]

Als weiteres Ergebnis der Studie kann gesagt werden, dass es keinen Unterschied macht, ob die Strukturierung einer Fläche ausmodelliert oder gegen eine ebene Fläche mit einem entsprechenden frequenzabhängigen Streugrad ausgetauscht wird. In vergleichenden Simulationen konnten diesbezüglich keine signifikanten Unterschiede in den Simulationsergebnissen festgestellt werden.



Abbildung 2.1: Übersicht über die normierten Berechnungsfehler der untersuchten Softwarepakete [Bor05b]

Da die Ergebnisse bei allen untersuchten Softwarepaketen prinzipiell ähnlich sind, fällt es bei den im Rahmen dieser Arbeit diskutierten Simulationsergebnissen nicht ins Gewicht, dass die Untersuchungsergebnisse der Ringvergleiche anonym veröffentlicht wurden. Es lässt sich leider nicht sagen, welches der in den Ringvergleichen diskutierten Programme das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Softwarepaket EASE von SDA ist.

2.1 Verwendete Software

Zur akustischen Planung des Orgel-Konzertsaals verwende ich die Software EASE der Firma Software Design Ahnert GmbH in der Version 4.3. Das Softwarepaket EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers) besteht aus mehreren Programmmodulen, die zur raumakustischen Planung und zur Durchführung akustischer Simulation verwendet werden können. Da ich im Rahmen der Masterarbeit nicht auf sämtliche Möglichkeiten der Software eingehen möchte, stelle ich hier nur die für die Arbeit relevanten Funktionen der Software vor und verweise für weitergehende Informationen auf das Handbuch [Ahn00].

Wie bereits erwähnt, ist der Ausgangspunkt für raumakustische Untersuchungen mit EASE immer das 3D-Computermodell des zu untersuchenden Raumes. Zur Konstruktion des Modells, üblicherweise auf Grundlage vorhandener Baupläne wie Grundrisse, Seitenansichten und Schnitte, stellt EASE eine Reihe von Werkzeugen zum maßstabsgerechten Modellieren des Raumes zur Verfügung. Die Abbildung 2.2 zeigt das Drahtgittermodell des geplanten Orgel-Konzertsaals der Philharmonie Charkow im Edit Projekt-Fenster von EASE.



Abbildung 2.2: EASE, Edit Projekt-Fenster

Wie detailliert ein Raum nachmodelliert wird, ist je nach Aufgabenstellung unterschiedlich. In [Ahn08, S.242] wird empfohlen, Strukturen, deren Abmessungen kleiner als 10 cm sind, nicht nachzumodellieren, da sie für die Berechnung raumakustischer Kriterien im interessierenden Frequenzbereich keine Rolle spielen. In [Vor08, S.176] wird sogar angeregt, Strukturen kleiner als 50 cm nur in Ausnahmefällen auszumodellieren. Die Detailstufe des erstellten Modells, d.h. die Anzahl der verwendeten Flächen, hat außerdem einen erheblichen Einfluß auf die Dauer der Rechenzeit raumakustischer Simulationen. Je mehr Flächen zum Aufbau eines Modells verwendet werden, d.h. je feiner ein Modell aufgelöst ist, desto länger dauert die Berechnung raumakustischer Simulationen.

Um raumakustische Untersuchungen im Modell durchführen zu können, müssen den Begrenzungsflächen des Raumes (Decke, Boden, Wände etc.) akustische Eigenschaften, d.h. die frequenzabhängigen Werte für Absorptionsgrad und Streugrad, zugewiesen werden. Hierzu kann man entweder auf eine umfangreiche Materialdatenbank zurückgreifen oder in einem Materialeditor per Hand neue Materialien definieren. Die Abbildung 2.3 zeigt den Materialeditor von EASE mit dem Frequenzgang eines im Modell des Orgel-Konzertsaals verwendeten Materials.



Abbildung 2.3: EASE, Materialeditor

Sind Geometrie und akustische Eigenschaften der Begrenzungsflächen eines Raummodells eingegeben, so können die statistisch berechneten Parameter (z.B. Nachhallzeiten nach Sabine oder Eyring) des Raumes direkt im Edit Project-Fenster abgelesen und durch Materialänderungen im Raum optimiert werden. Um weiterführende akustische Simulationen und Messungen durchführen zu können, muss das 3D-Modell des Raumes mit virtuellen akustischen Quellen und Empfängern ergänzt werden.

Eine akustische Quelle kann z.B. die Nachbildung einer natürlichen Quelle, eine einfache und breitbandig abstrahlende Kugelquelle (ähnlich einem dodekaederförmigen realen Messlautsprecher) oder auch eine ganze Beschallungsanlage sein. In Datenbanken stehen sowohl natürliche Schallquellen wie Sprecher und klassische Instrumente wie auch Lautsprechersysteme verschiedener Hersteller zur Verfügung. Eigene akustische Quellen können in EASE in einem extra Programmmodul definiert werden.

Empfänger sind in diesem Zusammenhang Bereiche oder Punkte, an denen akustische Messungen durchgeführt werden. Die Simulation eines Empfangsbereichs, also z.B. die Simulation eines Zuschauerbereichs, erfolgt durch so genannte Hörerflächen. Hörerflächen entsprechen einem Raster aus einzelnen Empfangspunkten, deren Abstand im Programm angegeben werden kann. Punktuelle Messwerte, also Messwerte wie sie z.B. real durch ein Messmikrofon ermittelt werden, erhält man durch einzelne Hörerplätze. Hörerflächen und Hörerplätze können wie auch die Schallquellen frei im Raum verteilt werden. Sind Sender und Empfänger in dem Modell eines Raumes positioniert, können mit EASE akustische Messungen simuliert werden. Zur Berechnung der akustischen Simulationen stehen unterschiedlich aufwändige Verfahren zur Verfügung; diese werden in Kapitel 2.2 näher erläutert.

Die durch Simulation gewonnenen Ergebnisse, d.h. die berechneten akustischen Kriterien, werden durch sog. Mappingdarstellungen abgebildet, bei Hörerflächen entweder in einer grafischen Ansicht örtlich verteilt auf der Hörerfläche selber oder als Tabelle bzw. Schaubild. Bei Hörerplätzen gibt es die Möglichkeit der Darstellung als Tabelle bzw. Schaubild. Die Ergebnisse können sowohl örtlich, d.h. über mehrere Hörerplätze oder -flächen oder im Frequenzbereich gemittelt werden. Die Abbildung 2.4 zeigt das Ergebnis einer Simulation im Evaluierungsfenster von EASE als Schaubild.



Abbildung 2.4: EASE, Evaluierungsfenster

Mit dem Programmmodul Ray Tracing können Reflexionsmuster innerhalb eines Raumes untersucht werden. Durch das Aussenden von Strahlen und die Darstellung ihrer Reflexionswege können z.B. die Auswirkungen von Wandstrukturen auf das Schallfeld sichtbar gemacht werden. Hierbei werden im Vergleich zur Berechnung von Reflektogrammen vergleichsweise wenige Strahlen in den Raum eingebracht und verfolgt. Diese Technik eignet sich insbesondere zur Überprüfung der Ausrichtung von Flächen zur gezielten Schalllenkung und zum anschaulichen Finden störender Echoeffekte. Die Abbildung 2.5 zeigt das Ergebnis einer Ray Tracing-Untersuchung im geplanten Orgel-Konzertsaal.


Abbildung 2.5: EASE, Ray Tracing-Untersuchung

2.2 Berechnungsverfahren

Die Grundlage zur Bestimmung raumakustischer Kriterien ist immer die Impulsantwort des simulierten Raumes. Da ein Raum in guter Näherung als ein LTI-Übertragungssystem behandelt werden kann, werden seine akustischen Eigenschaften durch seine Impulsantwort vollständig beschrieben. [Ahn08, S.186] Zur Berechnung dieser stehen verschiedene und unterschiedlich aufwändige Berechnungsverfahren zur Verfügung.

Neben den in 2.2.1 beschriebenen Methoden aus der geometrischen Raumakustik gibt es auch Methoden aus der statistischen und wellentheoretischen Raumakustik. Diese eigenen sich jedoch nur bedingt zum Berechnen raumakustischer Simulationen. Rechenverfahren die auf statistischer Raumakustik beruhen, liefern nur ungenaue Ergebnisse. Rechenmodelle die auf wellentheoretischer Raumakustik beruhen sind zum derzeitigen Zeitpunkt nur für tiefe Frequenzen umsetzbar.

2.2.1 Allgemeine Prinzipien

Es lassen sich grundsätzlich zwei klassische Verfahren zur Berechnung der Raumimpulsantwort unterscheiden. Diese können beide der geometrischen Raumakustik zugeordnet werden. Die erste verwendet Spiegelschallquellen, die zweite - Ray Tracing - verwendet Schallteilchen, deren Ausbreitungsweg zwischen Sender und Empfänger im Raum verfolgt wird. Beide Methoden sind hinreichend in der Literatur diskutiert und vorgestellt; Spiegelschallquellen z.B. in [Kir78], Ray Tracing z.B. in [Vor88]. Zusätzlich gibt es hybride Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Raumimpulsantwort, die beide Methoden kombinieren. Hybride Verfahren werden z.B. in [Sch01], [Fei07] oder [Vor89] vorgestellt.

Geometrische Raumakustikmodelle gehen immer von ebenen Wellen und ebenen Begrenzungsflächen aus; die Ausbreitung der Schallteilchen kann so auf geraden Linien durch den Raum verfolgt werden. Auch wenn diese Bedingungen nicht der Realität entsprechen, können unter der Voraussetzung, dass die Begrenzungsflächen groß im Verhältnis zu den Wellenlängen sind, gute Ergebnisse erzielt werden. [Sch01]

${\bf Spiegels chall quellen-Verfahren}$

Bei dem Spiegelschallquellen-Verfahren erzeugt eine Schallquelle an jeder Begrenzungsfläche des untersuchten Raumes eine virtuelle Spiegelschallquelle. Die so gefundenen Spiegelschallquellen erster Ordnung werden nun wiederum an allen Begrenzungsflächen des Raumes gespiegelt und es entstehen Spiegelschallquellen zweiter Ordnung. Dies geschieht bis zu einer festgelegten Ordnung n. Durch eine dem Absorptionsgrad einer Wand entsprechende Energieverminderung der jeweiligen Spiegelschallquelle wird die schallabsorbierende Wirkung der Begrenzungsfläche berücksichtigt. Der Streugrad einer Oberfläche kann mit dieser Methode jedoch nicht abgebildet werden.

Nicht alle so ermittelten Spiegelschallquellen sind für den Empfänger "sichtbar", d.h. nicht allen Spiegelquellen kann ein geometrisch sinnvoller Reflexionsweg zwischen Sender und Empfänger zugeordnet werden. Ob eine Spiegelschallquelle für den Empfänger sichtbar ist oder nicht, muss für jede Spiegelquelle einzeln überprüft werden.

Durch dieses sehr anschauliche Rechenmodell können zeitliche und räumliche Reflexionen in einem Raum exakt berechnet werden, der Nachteil liegt in dem sehr hohen Rechenaufwand. Der Rechenaufwand steigt exponentiell mit der Ordnung der bestimmten Spielquellen und mit der Anzahl der Begrenzungsflächen des Raumes. Hinzu kommt noch, dass die "Sichtbarkeit" des Reflexionswegs jeder Spiegelquelle einzeln überprüft werden muss. [Vor89], [Vor08, S.199]

Ray Tracing

Bei der Ray Tracing-Methode bzw. Strahlverfolgung sendet eine Schallquelle unter einer statistisch vorgegebenen Winkelverteilung und je nach Abstrahlcharakteristik der Quelle Schallteilchen mit einer bestimmten Energie aus. Die Schallteilchen bewegen sich auf geraden Linien im Raum, bis sie auf eine Begrenzungsfläche treffen und reflektiert werden. Bei der Berechnung von Reflexionen wird neben dem Energieverlust eines Schallteilchens durch den Absorptionsgrad auch der Streugrad der Oberfläche in die Berechnung mit einbezogen. Der Weg jedes Schallteilchens wird im Raum über mehrere Reflexionen verfolgt. Unterschreitet ein Schallteilchen einen vorgegebenen Energiegrenzwert oder eine angegebene Verfolgungszeit, wird die Strahlenverfolgung abgebrochen.

Trifft ein Schallteilchen auf seinem Weg auf einen Empfänger, so werden die Energie und die Ankunftszeit des Schallteilchens registriert und gespeichert. Aus den so gewonnenen lokalen "Trefferdaten", d.h. Energiedichten, wird nach zeitlicher Sortierung ein Reflektogramm bzw. Echogramm bestimmt. Das Ergebnis ist also eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Energie über die Zeit, die auch als Energie-Impulsantwort interpretiert werden kann. Aus der so gewonnenen Energie-Impulsantwort können zahlreiche energetische raumakustische Kriterien berechnet werden. [Vor08, S.181]

Der Unterschied zwischen Echogramm und Reflektogramm besteht darin, dass ein Echogramm alle an einem Ort in einem bestimmten Zeitfenster eintreffende Energie speichert. Ein Reflektogramm registriert einzelne Reflexionen an einem bestimmten Ort und speichert diese.

Da nicht alle möglichen Reflexionswege verfolgt werden und nicht alle Strahlen am Empfänger ankommen, ist die Güte des Ergebnisses stark von der Anzahl der ausgesendeten Strahlen abhängig. Werden die Berechnungen mit zu wenigen Strahlen durchgeführt, kann es sein, dass wichtige Reflexionswege nicht gefunden werden oder nicht genügend Schallteilchen am Empfänger ankommen.

Der Berechnungsaufwand ist bei diesem Rechenmodell geringer als bei der Spiegelschallquellen-Methode; er steigt linear mit der Zeit und ist proportional zur Anzahl der Begrenzungsflächen des Raumes. Die zeitliche Auflösung und die Qualität der Ergebnisse ist im Vergleich mit der Spiegelschallquellen-Methode jedoch geringer. [Vor89], [Sch01], [Vor08, S.181]

Hybride Verfahren

Hybride Berechnungsverfahren kombinieren die Vorteile der beiden vorgestellten Methoden. In der in [Vor89] vorgestellten Methode wird Ray Tracing zum Finden gültiger Reflexionswege zwischen Sender und Empfänger benutzt. Dadurch, dass die Reflexionswege der ausgesandten Schallstrahlen gespeichert werden, können den Reflexionswegen gültige Spiegelschallquellen zugeordnet werden. Auch hier werden durch eine entsprechende Energieverminderung der Spiegelschallquellen die Absorptionsgrade der involvierten Begrenzungsflächen berücksichtigt. Der Vorteil gegenüber der Spiegelschallquellen-Methode liegt darin, dass der Berechnungsschritt des Selektierens der "sichtbaren" Spiegelquellen aus allen möglichen Spiegelquellen entfällt. Allerdings kann es sein, dass verschiedene Strahlen den gleichen Reflexionsweg haben und somit einer Spiegelschallquelle entsprechen. Um diese Mehrfachdetektion zu verhindern, muss jede Spiegelschallquelle mit allen vorher gefundenen Quellen verglichen werden. Alternativ können Beam Tracing-Verfahren (siehe z.B. [Dad85]) zum Finden der Reflexionswege verwendet werden.

Da mit dem beschriebenen hybriden Verfahren nicht alle möglichen Spiegelschallquellen gefunden werden, ist sie weniger exakt als die Spiegelschallquellen-Methode. Allerdings werden insbesondere Spiegelschallquellen sehr kleiner Begrenzungsflächen "übersehen", die ohnehin nur von geringer akustischer Relevanz sind und den Rechenaufwand zusätzlich erhöhen würden. [Vor08, S.210]

Mit dem beschriebenen hybriden Verfahren können durch die Verwendung von Spiegelschallquellen hoher Ordnung zeitliche und räumliche Reflexionen in einem Raum sehr exakt berechnet werden. Eine Einschränkung der Methode ist jedoch, dass die schallstreuende Wirkung von Begrenzungsflächen eines Raumes nicht in die Berechnung mit einbezogen wird. Sind also für eine Anwendung neben zeitlich exakt berechneten Reflexionen auch diffuse Reflexionen notwendig, so muss das beschriebene hybride Verfahren mit klassischem Ray Tracing kombiniert werden.

Um die ersten Reflexionen einer Impulsantwort mit einer möglichst exakten zeitlichen Auflösung zu berechnen, wird in [Sch01] und [Fei07] ein Verfahren vorgestellt, bei der die ersten Reflexionen mit der beschriebenen hybriden Methode berechnet werden. Für den diffusen Anteil der Impulsantwort und späte Reflexionen sind die Anforderung an die zeitliche Auflösung nicht so hoch. Diese Teile der Impulsantwort können folglich mit Ray Tracing berechnet werden. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass nur Strahlen, die auf ihrem Weg zum Empfänger mindestens einmal gestreut reflektiert wurden, vom Empfänger registriert werden. Der Übergang zwischen beiden Berechnungsmethoden kann entweder ein bestimmter Zeitpunkt oder eine Reflexionsordnung sein.

2.2.2 Berechnungsverfahren in EASE

Zur Berechnung raumakustischer Kriterien stellt EASE verschiedene Methoden und Module zur Verfügung.

Das einfachste in EASE implementierte Rechenmodell, das Standard Mapping, benutzt eine statistische Formel zur Berechnung reflektierter Schallpegel aus den statistischen diffusen Nachhallzeiten und dem Direktschallpegel einer Quelle. [Ahn00] Die zugrunde liegenden statistischen Formeln gehen von einer idealisierten örtlichen und zeitlichen Gleichverteilung der Nachhallzeit aus. Die so gewonnenen Ergebnisse sind folglich nicht sonderlich präzise. Da die Berechnungen aber vergleichsweise unaufwändig und daher nicht so zeitintensiv sind, eignen sie sich gut, um vor einer aufwändigen Simulation erste orientierende Ergebnisse zu bekommen. [Ahn08, S.244]

Um aussagekräftige und möglichst genaue Ergebnisse bei der Berechnung der raumakustischen Kriterien zu bekommen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich das in EASE implementierte rechenintensive AURA (Analysis Utility for Room Acoustics) Modul verwendet. AURA basiert auf dem von der Universität Aachen (RWTH) entwickelten CAESAR-Algorithmus (siehe [Sch01]) und ermöglicht die Berechnung aller in ISO 3382, dem Internationalen Standard für raumakustische Messungen, definierten raumakustischen Parameter. [Ahn00]

EASE beinhaltet zwei unterschiedliche AURA Module, AURA Mapping und AURA Response. AURA Mapping erzeugt ein Echogramm und bildet die daraus abgeleiteten akustischen Maße auf Hörerflächen oder Hörerplätzen ab. AURA Response berechnet ein Reflektogramm, aus dem monaurale und binaurale Impulsantworten abgeleitet werden können.

AURA Mapping verwendet die in 2.2.1 beschriebene Ray Tracing-Methode zum Berechnen eines Echogramms. Aus diesem werden die akustischen Kriterien in 21 Terzbändern zwischen 100 Hz und 10 kHz abgeleitet. Die zeitliche Auflösung des Echogramms von 1 ms ist zur Berechnung der akustischen Kriterien ausreichend, eignet sich jedoch nicht zur Auralisation. [Sch01]

AURA Response basiert auf dem in 2.2.1 beschriebenen hybriden Berechnungsverfahren. Da der erste Teil des berechneten Reflektogramms durch einen Spiegelquellen-Algorithmus berechnet wird, ist die zeitliche Auflösung der ersten Reflexionen so hoch, dass sich die abgeleitete Impulsantwort zur Auralisation eignet. Der Übergang zwischen Spiegelschallquellenund Ray Tracing-Berechnung wird durch eine vom Anwender angegebene Reflexionsordnung bestimmt. Der Übergang wird also nicht nach einer bestimmten Zeit, sondern nach einer bestimmten Reflexionsordnung vollzogen. Dadurch werden ggf. auftretende, zur Auralisation wichtige, energiereiche späte Reflexionen niedriger Ordnung, wie sie in großen Räumen auftreten können, leichter erfasst. Zur Berechnung der monauralen Impulsantwort werden alle 21 Terzbandreflektogramme mit einer Einheitskugel gefaltet. Dies entspricht der Impulsantwort, die man in der Realität mit einem Mikrofon mit Kugelcharakteristik messen würde. Die binaurale Impulsantwort kann im Programmodul EASE EARS berechnet und zu Auralisationszwecken verwendet werden. [Sch01], [Ahn00] Um die Absorptionsgrade von Begrenzungsflächen eines Raumes während der Strahlenverfolgung in die Berechnung mit einzubeziehen, gibt es in EASE zwei Konzepte. Bei "energy loss" wird die Energie eines Schallteilchens dem Absorptionsgrad einer Wand entsprechend verringert und anschließend reflektiert. Bei "particle loss" wird bei jeder Reflexion eine Zufallszahl zwischen null und eins erzeugt und mit dem Absorptionskoeffizienten der Begrenzungsfläche verglichen. Ist die Zufallszahl kleiner oder gleich dem Absorptionskoeffizienten, wird die Strahlenverfolgung abgebrochen. Da sich dadurch mit der Zeit die Anzahl der verfolgten Schallteilchen verringert, führt diese Methode schneller zu Ergebnissen, ist jedoch auch weniger genau.

Um der schallstreuenden Wirkung von Begrenzungsflächen Rechnung zu tragen, wird eine ähnliche Methode verwendet. Immer wenn ein Schallteilchen auf eine Begrenzungsfläche trifft, wird eine Zufallszahl zwischen null und eins erzeugt und mit dem Streugrad der Wand verglichen. Ist die Zufallszahl kleiner oder gleich dem Streugrad, wird das Schallteilchen nicht geometrisch reflektiert, sondern gestreut. Die Richtung des gestreuten Schallteilchens wird nach dem Lambertschen Gesetz für eine ideal diffuse Oberfläche aus zwei weiteren Zufallszahlen bestimmt. [Sch01], [Fei07]

Der Rechenaufwand und die Güte der Ergebnisse werden bei diesen Verfahren hauptsächlich durch die Anzahl der ausgesandten Schallteilchen bestimmt. Um zu überprüfen, ob die Simulation mit einer ausreichend hohen Anzahl an Schallteilchen gerechnet wurde, erzeugt EASE zur Gültigkeitsprüfung ein Histogramm. Das Histogramm zeigt die Anzahl der innerhalb eines 1 ms breiten Intervalls gespeicherten Treffer. Die Treffer sollten, wie in Abbildung 2.6 zu sehen, über den gesamten Zeitraum sowohl dicht wie auch konstant sein. Als absolute Anzahl von Treffern innerhalb eines Intervalls empfiehlt das Handbuch wenigstens 10 Treffer für eine genügend detaillierte Simulation. [Ahn00]

Die Ungenauigkeiten der beschriebenen Rechenmodelle liegen, wie bereits in 2.2.1 beschrieben, verfahrensbedingt im tiefen Frequenzbereich. Diese können mit der zugrunde liegenden geometrischen Raumakustik nur bis zu einer bestimmten Grenze zuverlässig abgebildet werden. Außerdem werden nur mit wellentheoretischer Raumakustik beschreibbare Effekte wie Beugungseffekte und Interferenzen nicht in die Berechnungen mit einbezogen. [Sch01], [Vor08, S.213]



Abbildung 2.6: EASE, Histogramm

Die Voraussetzung für gute Ergebnisse ist, neben der Erfahrung des Anwenders, immer auch ein speziell an die Anforderungen der akustischen Simulationen angepasstes Modell des zu untersuchenden Raumes. Dies umfasst sowohl die räumliche Auflösung des Modells sowie möglichst präzise Informationen über die verwendeten Materialien und deren Absorptionsund Streugrade. Sind diese Voraussetzungen jedoch erfüllt und wird die durchgeführte AURA-Simulation mit einer ausreichenden Anzahl an Schallteilchen und Reflexionen durchgeführt, sind die Ergebnisse einer Simulation so genau, dass sie sich zum Verifizieren raumakustischer Maßnahmen eignen. [Ahn00]

3 Umsetzung

Wie bereits beschrieben, wurde zur raumakustischen Planung des Orgel-Konzertsaals das Softwarepaket EASE in der Programmversion 4.3 verwendet. Um raumakustische Untersuchungen und simulierte Messungen durchzuführen, wurden von allen beschriebenen Entwürfen 3D-Computermodelle angefertigt.

Um eine Vergleichbarkeit der durchgeführten Simulationen zu ermöglichen, waren die Simulationsparameter in allen 3D-Modellen identisch. Dies umfasst sowohl die Positionen der Lautsprecher und der Empfangsplätze in den Modellen, wie auch das zu Grunde liegende Berechnungsverfahren und alle einstellbaren Berechnungsparameter. Die raumakustischen Simulationen wurden mit dem Programmmodul Room Mapping durchgeführt; zur Berechnung wurde das in Kapitel 2.2.2 vorgestellte AURA Mapping verwendet.

Zum Durchführen der raumakustischen Simulationen wurde prinzipiell eine klassische raumakustische Messsituation nachgebildet. Diese besteht im Wesentlichen aus einem dodekaederförmigen, kugelförmig abstrahlenden Messlautsprecher als Sender und im Raum verteilten Messmikrofonen als Empfänger.

Da die Berechnung von Reflektogrammen auf Hörerflächen durch viele Schallteilchen und ein dichtes Empfangsraster sehr rechenintensiv sein kann und mitunter mehrere Tage dauert, wurden einzelne Hörerplätze als Empfänger im Raum verteilt. Genau berechnete Reflektogramme an repräsentativen einzelnen Empfangsplätzen sind weniger gut aufgelösten Reflektogrammen auf einem Hörerflächenraster in jedem Fall vorzuziehen. Wie in [Ahn00] beschrieben, ist diese Methode ein guten Kompromiss aus Genauigkeit und Rechendauer.

In den untersuchten 3D-Modellen wurden zum Anregen des Raumes zwei breitbandig abstrahlende Kugelschallquellen als Sender platziert. Als Empfänger bzw. Messmikrofone wurden einzelne Hörerplätze im gesamten Raum und insbesondere auch an charakteristischen Hörerplätzen im Publikumsbereich verteilt. Auf die Verwendung von Hörerflächen, also Empfangsrastern, wurde aufgrund der sehr langen Berechnungszeiten bei einer angemessen hohen Auflösung verzichtet. Die Simulationen wurden, wie in Abbildung 3.1 zu sehen, mit 2261000 ausgesandten Schallteilchen (Particles) und über eine Dauer (Lenghts) von 2590 ms durchgeführt. Nach [Ahn00] sollte die Dauer mindestens zwei Drittel der erwarteten Nachhallzeit betragen. Mit einer zu erwartenden Nachhallzeit von ca. 3 s genügt der Wert von 2590 ms dieser Anforderung.

Calculation Par	ameters		2	
Settings	Items	Noise	Calculation	
Room Acoustic Calculation by AURA Module Version 3.0, (Analysis Utility for Room Acoustics) AURA Mapping based on CAESAR algorithms developed by Aachen University (RWTH)				
Parameters				
Particles :	High Resolution,	Slow	2261000	
Length [ms] :	Standard, Fast	•	2590	
Default Value [%] for Surfaces without Scattering Data :				
	Slightly Structure	d Surfaces 📃 💌	20	
Number of Calcula	ation Threads :			
	2 Threads	•	2	
Note: Computation time also depends on the number of faces and receivers				
Advanced Options >>				
<< Back	Next>>	Ok	Cancel	

Abbildung 3.1: AURA Mapping, Programmdialog

Als Wert für den Streugrad wurde der Defaultwert von 20% übernommen, was einem Streugrad leicht strukturierter Oberflächen entspricht. Wurde für ein verwendetes Material ein individueller, frequenzabhängiger Streugrad definiert, hat diese Einstellung keinen Einfluss auf die Berechnung. Wie in Kapitel 2 bereits beschrieben, kann die Struktur einer Oberfläche entweder ausmodelliert oder einer ebenen Fläche ein entsprechender frequenzabhängiger Streugrad zugewiesen werden, ohne dass signifikante Unterschiede in den Simulationsergebnissen feststellbar sind. In den Modellen kamen beide Methoden zum Einsatz. Als Rechenmodell zur Berechnung der schallabsorbierenden Wirkung der in den Modellen verwendeten Materialien wurde bei allen Simulationen das in Kapitel 2.2.2 beschriebene Verfahren "energy loss" verwendet.

3.1 Simulationsergebnisse im Erstentwurf

Auf Grundlage der vorliegenden AutoCAD-Pläne und des SketchUp-Modells des Architekten Michael S. Rabinowitsch wurde mit EASE ein maßstabgerechtes 3D-Modell des Erstentwurfs des geplanten Orgel-Konzertsaals erstellt. Die Abbildung 3.2 zeigt das entsprechende EASE-Modell, in dem die Simulationen durchgeführt wurden. Alle relevanten inneren Begrenzungsflächen wurden nachmodelliert und den Oberflächen akustische Eigenschaften zugewiesen. Da den Plänen keine detaillierten Materialbeschreibungen beilagen, wurde von überwiegend schallharten Materialien wie Glattbeton oder Gipsputz der Wände und der Decke ausgegangen. Als Bodenbelag wurde Parkett angenommen. Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen dem Erstentwurf und dem eigenen Entwurf für den Orgel-Konzertsaal zu gewährleisten, wurden im Modell des Erstentwurfs die gleichen Materialien wie im eigenen Entwurf verwendet. Eine genauere Spezifikation der Materialien findet sich in Kapitel 3.2.2.



Abbildung 3.2: Erstentwurf des Orgel-Konzertsaals, EASE-Modell

Die Tabelle 3.1 zeigt die prozentuale Verteilung der Materialien im EASE-Modell. Fast 70% der Materialien sind nahezu schallhart, die Publikumsfläche bzw. das Gestühl ist die einzige stark absorbierende Fläche im Modell.

Material	Anteil der Innenfläche	
Wand, unterer Saalbereich	33%	
Decke	20%	
Wand, oberer Saalbereich	16%	
Bodenbelag	14%	
Publikum	12%	
Orgelverkleidung	5%	

Tabelle 3.1: Prozentuale Verteilung der Materialien im Erstentwurf

Wie bereits in 1.1.3 erwähnt, reduziert sich das Rohbauvolumen durch die großzügigen Innenraumaufbauten auf ca. 6600 m^3 . Bei der geforderten Sitzplatzanzahl von 550 Sitzmöglichkeiten ergibt sich so für die Volumenkennzahl ein Wert von 12 m³. Dieser Wert liegt am unteren Rand des geforderten Wertebereiches und ist somit als akzeptabel anzusehen.

Die raumakustischen Simulationen wurden, wie in Kapitel 3 beschrieben, im Programmmodul Room Mapping berechnet. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden über die im Modell verteilten Empfangsplätze gemittelt.

Die Abbildung 3.3 zeigt das Ergebnis der im Modell gemessenen Nachhallzeit. Die erzielte Nachhallzeit liegt mit einem Einzahlwert von ca. 2 s unter dem geforderten Wert von ca. 2,5 - 3,2 s. Der sehr konstante Verlauf der Nachhallzeit über die Frequenzen mit einem leichten Anstieg im tiefen Frequenzbereich entspricht jedoch prinzipiell den formulierten Vorgaben.







Die Abbildung 3.4 zeigt das Ergebnis der im Modell durchgeführten C80-Untersuchung. Mit einem Einzahlwert von ca. 0,5 dB liegt der ermittelte Wert im interessierenden Frequenzbereich über den geforderten (-2 ± 2) dB.

Mit den ermittelten Werten für die Nachhallzeit und C80 bietet der entworfene Saal eine sehr gute Hörsamkeit für klassische Konzerte. Auch ist im vorgestellten Erstentwurf aufgrund der Wandgestaltung mit einem weitgehend gleichmäßigen und diffusen Schallfeld zu rechnen. Vergleicht man die berechneten Simulationsergebnisse aber mit den in 1.2 formulierten Vorgaben, so liegen die Werte außerhalb oder im Randbereich der beschrieben Zielintervalle. Insgesamt fehlt es dem Erstentwurf vor allem an akustisch aktivem Volumen, um die geforderte lange Nachhallzeit zu ermöglichen.



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 09.09.2010 18:16:57 / Holger Struchholz histruchholz

Abbildung 3.4: Erstentwurf des Orgel-Konzertsaals, C80

3.2 Eigener Entwurf

Da der Erstentwurf des Orgel-Konzertsaals die formulierten Vorgaben nicht zur vollen Zufriedenheit erfüllen konnte, entschied sich die Firma ADA dafür, einen grundlegend neuen Saalentwurf zu entwickeln. Um optimale Voraussetzungen für die Aufführung von Orgelkonzerten zu schaffen, sollte sich die Hörsamkeit des Orgel-Konzertsaals im neuen Konzept eindeutig an der Hörsamkeit von Sakralbauten orientieren.

Beim Entwurf des neuen Orgel-Konzertsaals galt es zusammengefasst, folgende Punkte zu beachten:

Anforderungen des Auftraggebers:

- Ausreichend Platz zwischen Außen- und Innenwand für technische Einbauten
- Im Deckenbereich Raum für Beleuchtungsbrücken und technische Einbauten
- Sitzplätze für 550 Zuschauer; dies macht einen Balkon im Zuschauerbereich notwendig
- Im Bühnenbereich Platz für einen Chor und ein klassisches Orchester
- Kleine Tonregie im hinteren Saalbereich
- Ansprechende innenarchitektonische Gestaltung des Konzertsaals

Anforderungen an die raumakustischen Kriterien:

- Nachhallzeit von ca. 2,5 3,2 s; möglichst gleichmäßige Nachhallzeit über die Frequenzen
- Klarheitsmaß C80 von (-2 ± 2) dB
- Möglichst breitbandig diffuses Schallfeld
- Echofreiheit des Schallfeldes

44 3 Umsetzung

Auf Grundlage der genannten Anforderungen wurde in Zusammenarbeit mit dem Architekturbüro gmp [gmp] ein Entwurf für den geplanten Orgel-Konzertsaal ausgearbeitet. Hierbei wurden die notwendigen raumakustischen Maßnahmen und akustisch wirksamen Gestaltungsvorschläge von ADA, also der akustische Prinzipentwurf, von gmp in ein innenarchitektonisches Gesamtkonzept umgesetzt.

Der gesamte Arbeitsprozess umfasste viele Zwischenschritte, die im Rahmen dieser Arbeit nicht im Einzelnen vorgestellt und diskutiert werden. Von allen Entwürfen wurden von gmp SketchUp-Modelle angefertigt, die jeweils als Grundlage zum Aufbau der entsprechenden EASE-Modelle dienten. In den EASE-Modellen der Architekturentwürfe wurden anschließend raumakustische Simulationen durchgeführt und die raumakustischen Maßnahmen überprüft. Durch eine iterative Annäherung an die Vorgaben konnte so ein Entwurf gefunden werden, der die formulierten Vorgaben in allen Punkten erfüllt.

Die Abbildungen 3.5 und 3.6 zeigen den finalen, in Zusammenarbeit mit dem Architekturbüro gmp entstandenen Entwurf für den Orgel-Konzertsaal in Charkow als 3D-SketchUp-Modell in verschiedenen Ansichten.



Abbildung 3.5: Entwurf für den Orgel-Konzertsaal, Schnittperspektive



Abbildung 3.6: Entwurf für den Orgel-Konzertsaal, Blick auf die Orgel

3.2.1 Maßnahmen Primärstruktur

Bei den Gestaltungsmöglichkeiten der Primärstrukur sind die räumlichen Grenzen durch den bereits bestehenden Rohbau klar vorgegeben. Zusätzlich ist zu beachten, dass zwischen der bereits bestehenden Außenwand und der zu planenden Innenwand Raum für technische Einbauten und Kanäle vorhanden sein muss.

Basierend auf den Erfahrungen der Firma ADA beim Bau des Berliner Konzerthauses wurden für Kabel- und Kanalschächte in den Seitenbereichen des Konzertsaals mindestens 1,5 m vorgesehen. Somit verringert sich die Nettobreite des Saales gegenüber den Rohbaumaßen um insgesamt ca. 3 m. Auch an der hinteren Saalrückwand wurde dieser Hohlraum von 1,5 m Breite berücksichtigt.

Im Deckenbereich ist zwischen Innen- und Außendecke ebenfalls Raum für technische Einbauten notwendig. Durch die ca. 1,6 m hohe Binderebene direkt unter der Außendecke ist von vornherein prinzipiell genügend Raum für Kabel- und Kanalschächte gegeben. Zusätzlich wurde ein Abstand von mindestens ca. 0,5 m zwischen Innendecke und Binderebene eingehalten.

Volumenkennzahl

Um die gewünschte lange Nachhallzeit im geplanten Orgel-Konzertsaal zu ermöglichen, muss ein möglichst hohes akustisch aktives Saalvolumen gegeben sein. Unter Berücksichtigung der oben genannten notwendigen Hohlräume wurde also darauf geachtet, die Innenwände immer möglichst dicht an den Außenwänden anzubringen. Auch die Orgel bzw. der Orgelkorpus ist im vorgestellten Entwurf nicht zusätzlich verschalt, sondern steht als Kasten offen im Raum. Durch den Innenraumaufbau, der Platz für die geforderten technischen Einrichtungen bereitstellt, sowie den Zuschauerbalkon und eine Tonregie berücksichtigt, verringert sich das ursprüngliche Rohbauvolumen von ca. 12000 m³ im vorgestellten Entwurf auf ca. 7880 m³. Mit 550 Zuschauern im Saal ergibt sich hieraus eine Volumenkennzahl von 14,3 m³. Diese liegt im oberen Bereich des geforderten Intervalls, was der angestrebten hohen Nachhallzeit mit Sicherheit zuträglich ist.

Raumform

Die Abbildungen 3.7 und 3.8 zeigen den Grundriss des Orgel-Konzertsaalentwurfs in der Parkett- und Rangebene. An beiden Seiten sind die seitlich eingeplanten Hohlräume für die technischen Einbauten zu erkennen. Grundsätzlich hat der Saal eine fast rechteckige Form. Der Sprung in der Breite des Rohbaus, der den Zuschauer- und Bühnenbereich trennt, ist im Innenausbau nicht auffällig zu sehen. Nur in der Rangebene ist die größere Breite des Rohbaus durch leicht schräg stehende, sich öffnende Seitenwände angedeutet. Wie in 1.2.2 bereits beschrieben, haben sich Konzertsäle mit grundsätzlich rechteckigem Grundriss in der Praxis sehr bewährt; Direktschall und energiereiche Anfangsreflexionen können den Zuschauerbereich ungehindert beschallen. Zur Vermeidung akustisch ungünstiger, parallel stehender Wände, wurden die Seitenwände in der Parkettebene durch eine Faltstruktur aufgelockert. Die Strukturierung der Wände, die sich durch diffus streuende Reflexionen positiv auf die Nachhallzeit und das Klangbild des Saales auswirkt, wird in Kapitel 3.2.2 näher beschrieben.



Abbildung 3.7: Entwurf für den Orgel-Konzertsaal, Grundriss Parkettebene



Abbildung 3.8: Entwurf für den Orgel-Konzertsaal, Grundriss Rangebene

Die Abbildung 3.9 zeigt den Längsschnitt des Orgel-Konzertsaals. Wie bereits erwähnt, wurde die Orgel bzw. der Orgelkasten offen im Raum installiert. Um Platz für eine kleine Tonregie zu schaffen, wurde im hinteren Parkettbereich unter dem Balkon die Rückwand nach vorne versetzt. Der Raum ist ca. 2,5 m hoch, 2 m tief und erstreckt sich über die gesamte Breite des Konzertsaals. Ebenfalls im Längsschnitt zu sehen ist die bereits in 1.2.2 beschriebene Sitzreihenüberhöhung im Zuschauerbereich.



Abbildung 3.9: Entwurf für den Orgel-Konzertsaal, Längsschnitt

Decke

Bei der Ausformung der Decke war vor allem die in Abbildung 3.9 gut zu erkennende, bereits bestehende Abstufung der Rohbaudecke zu berücksichtigen. Mit dem Ziel, möglichst viel aktives Volumen im Konzertsaal zur Verfügung zu haben, wurde die Innendecke auch hier möglichst dicht unter der Binderebene angebracht. Grundsätzlich ist also die stufige Gestalt der Saaldecke erhalten geblieben. Zur Auflockerung der großen Deckenflächen wurde auch an der Decke eine Strukturierung vorgesehen, deren Ausformung in Kapitel 3.2.2 genauer beschrieben wird.

In der Abbildung 3.9 ebenfalls zu sehen ist die Position der zwischen Außen- und Innendecke des Saales platzierte vorgesehenen Beleuchtungsbrücke. Die Abbildung 3.10 zeigt die Position der Beleuchtungsbrücke (dunkler Fensterstreifen) aus einem anderen Blickwinkel.



Abbildung 3.10: Entwurf für den Orgel-Konzertsaal, Blick von der Bühne in den Saal

Balkon

Die vertikale Lage des Zuschauerbalkons ist in Abbildung 3.9 zu sehen. An der Rückwand bietet der Balkon Raum für vier zusätzliche Zuschauerreihen. Auf eine ausreichende Sitzreihenüberhöhung wurde bei der Planung geachtet. An der Seite sind Plätze für eine Zuschauerreihe direkt an der Brüstung vorgesehen.

Wie bereits in 1.2.2 geschrieben, wirkt der Balkon mit seinen Abmessungen von einigen Metern bei tiefen Frequenzen als Diffusor und verhindert so das Auftreten von Schallkonzentrationen im tieffrequenten Bereich. Bei der Planung des Balkons wurden die in 1.2.2 formulierten Vorgaben für das Verhältnis aus Höhe und Tiefe beachtet und eingehalten. Die Höhe H der Öffnung zwischen Parkett und Balkon beträgt ca. 3,5 m, die Tiefe D liegt bei ca. 3 m. Die Höhe H der Öffnung zwischen Balkon und Decke beträgt ca. 6,5 m, die Tiefe liegt hier bei ca. 5 m. In beiden Fällen ist das Verhältnis $\frac{D}{H}$ wie gefordert kleiner als eins. Die Öffnungswinkel liegen mit 45° bzw. 65° in beiden Fällen ebenfalls im geforderten Bereich.

Orgel und Bühne

Es ist vorgesehen, die Orgel als frei stehenden Orgelkasten offen im Raum zu installieren. Auf eine zusätzliche seitliche Verschalung wurde zugunsten des höheren Saalvolumens verzichtet. Über dem frei stehenden Orgelkorpus befindet sich ein freier Luftraum von ca. 2,5 m. Die Position der Orgel im Raum ist durch den bereits gebauten Balkon vorgegeben, entspricht aber, wie in Kapitel 1.1.2 beschrieben, dem bevorzugten Standort für eine Konzertorgel. Auch die Höhe der Orgelempore von ca. 4 m entspricht wie gefordert in etwa $\frac{1}{3}$ der gesamten Saalhöhe.

Die Fläche des Bühnenbereichs hat sich durch die Verkleidung der Wände um ca. 10 m^2 reduziert und ist noch ca. 130 m^2 groß. Geht man von einem Platzbedarf eines Musikers von ca. $1,5 \text{ m}^2$ aus, so bietet die Bühne Raum für ca. 80 Musiker. Wird das Orgelkonzert durch ein Orchester unterstützt, so müssen im hinteren Bühnenbereich Podeste installiert werden, um eine akustische Verdeckung der hinteren Musiker zu vermeiden. Auf dem Balkon an der Vorderseite des Orgel-Konzertsaals kann bei Bedarf ein Chor platziert werden. Die Stufen vor der Orgel bieten Platz für ca. 40 Sänger.

3.2.2 Maßnahmen Sekundärstruktur

Die Ausgestaltung der Sekundärstruktur, also die Form der Decken- und Wandstrukturen und deren Materialbeschaffenheit, hat zum Ziel, die Hörsamkeit im Orgel-Konzertsaal an die formulierten Vorgaben anzupassen. Hierbei sind im geplanten Orgel-Konzertsaal insbesondere das Erzeugen eines gleichmäßigen, breitbandig diffusen Schallfeldes sowie die recht hohe Zielnachhallzeit von 2,5 - 3,2 s zu nennen.

Struktur der Oberflächen

Um im Orgel-Konzertsaal die Voraussetzungen für ein breitbandig diffuses Schallfeld zu schaffen, müssen die Begrenzungsflächen des Saales mit Strukturen unterschiedlicher Abmessungen aufgelockert werden. Als Vorraussetzung für die geforderte lange Nachhallzeit muss das gesamte Saalvolumen, d.h. insbesondere die gesamte Höhe des Saales, zum Aufbau eines Schallfeldes genutzt werden. Einige der Begrenzungsflächen sollten also so ausgerichtet sein, dass sie den Schall nach oben lenken. Wie in den Abbildungen 3.11 und 3.12 zu sehen, sind die Wände im Podiumsbereich und im unteren Saalbereich mit einer Tiefe von ca. 30 cm gefaltet. Parallele Wände und die Entstehung von Echoeffekten können dadurch vermieden werden. Wird das Orgelkonzert durch Orchestermusiker unterstützt, sorgt die gefaltete Podiumsrückwand für eine gut gestreute Schallabstrahlung der davor sitzenden Musiker.



Abbildung 3.11: Wandstruktur im unteren Saalbereich



Abbildung 3.12: Wandstruktur im unteren Saalbereich

An der Saalrückwand verhindert die Strukturierung, dass der Schall direkt auf die Bühne zurück reflektiert wird. In Abbildung 3.12 sind auch die in die Rückwand integrierten Fenster des kleinen Tonregieraums zu erkennen.

Die Abbildung 3.13 zeigt die Struktur der Wandelemente im oberen Saalbereich. Die Höhe eines Elements beträgt jeweils 1 m. Durch die nicht mittige vertikale Teilung der Fläche (Aufteilung $\frac{2}{3}$ zu $\frac{1}{3}$) werden mehr Reflexionen in den oberen als in den unteren Teil des Saales gelenkt. Die Strukturtiefe beträgt hier 20 cm. Die Abbildunge 3.14 zeigt eine aus den Wandelementen aufgebaute Seitenwand des Orgel-Konzertsaals.



Abbildung 3.13: Wandelement im oberen Saalbereich



Abbildung 3.14: Wandstruktur im oberen Saalbereich

Die Struktur der Wand findet sich in der Gestaltung der Rangbrüstung wieder; Abmessungen und Formgebung sind identisch. So können zum einen direkte Rückreflexionen auf die Bühne vermieden werden, zum anderen sind auch hier die Flächen darauf ausgelegt, den Schall in den oberen Saalbereich zu lenken.

Die Decke des Konzertsaals ist, wie in Abbildung 3.15 zu sehen, in der Längsrichtung prinzipiell ähnlich strukturiert wie die Seitenwand. Die Länge eines Elements beträgt 2,1 m. Die Flächen sind in ein $\frac{2}{3}$ und ein $\frac{1}{3}$ großes Teilstück unterteilt, die Strukturtiefe beträgt 30 cm. Die Flächen sind so ausgerichtet, dass der Schall durch Reflexion eher in den hinteren Teil des Saales transportiert wird. Zusätzlich ist die gesamte Decke entlang der Längsachse leicht nach außen gefaltet, d.h. ein Punkt auf der Mittelachse liegt 15 cm tiefer als ein Punkt am Rand der Decke.



Abbildung 3.15: Deckenstruktur

Kurz ist noch zu erwähnen, dass sich auch das durch Verzierungen strukturierte Orgelprospekt durch diffuse Reflexionen positiv auf das Schallfeld auswirken wird. Die Strukturtiefe durch Verzierungen beträgt ca. 20 - 30 cm; die endgültige Ausgestaltung der Verzierungen steht jedoch noch nicht fest.

Materialbeschaffenheit der Oberflächen

Um die geforderte Nachhallzeit von ca. 2,5-3,2 s zu ermöglichen, sollten die verwendeten Materialien im Orgel-Konzertsaal eher reflektierend als absorbierend sein. Neben dem stark absorbierenden Gestühl bzw. Publikum sind keine zusätzlichen Absorptionsflächen im Raum vorgesehen. Im Folgenden werden die Empfehlungen für die zum Innenausbau verwendeten Materialien näher spezifiziert. Die im EASE-Modell des Saales verwendeten entsprechenden Materialkoeffizienten werden in Kapitel 3.3.1 näher besprochen.

Die Wände im oberen Saalbereich sollten aus einem schallharten Material wie z.B. Gipsputz bestehen. Wichtig ist hier, dass der verwendete Wandaufbau massiv ist, d.h. einen Massenbelag von ca. 35 kg/m^2 hat. Die Verkleidung der unteren Saalwände und die Wand an der Vorderseite des Saales erfolgt aus optischen Gründen mit Holz bzw. Holzfurnier. Bei einem entsprechend massiven Aufbau, d.h. einem ähnlich hohen Massenbelag wie an den Wänden im oberen Saalbereich, sind auch diese Flächen im gesamten Frequenzbereich als nahezu schallhart anzunehmen.

Wie auch die Wände im oberen Saalbereich sollte die Decke des Konzertsaals aus einem schallharten Material wie z.B. Gipsputz bestehen. Da der Aufbau der Decke vermutlich nicht so massiv sein kann wie an den Wänden des Saales, sollte darauf geachtet werden, dass beim Aufbau ein Massenbelag von mindestens 12 kg/m^2 eingehalten wird. Dies verhindert das Auftreten von Absorptionseffekten im tiefen Frequenzbereich.

Der Boden des Konzertsaals sollte ebenfalls aus möglichst wenig absorbierendem Material wie z.B. Holzparkett bestehen. Teppichboden ist aufgrund der absorbierenden Wirkung im mittleren und hohen Frequenzbereich in allen Bereichen zu vermeiden.

Wie bereits in Kapitel 1.2.3 erwähnt, sollte das Gestühl ähnliche akustische Eigenschaften aufweisen wie eine auf dem Stuhl bzw. dem Sessel sitzende Person. Die Nachhallzeit wird so unabhängig von der Anzahl der anwesenden Personen, was insbesondere auch bei Proben wichtig ist. Die Sitzpolsterung und die Rückenlehne der Sitze sollten aus diesem Grund mit ca. 10 cm dickem, akustisch offenem Schaumstoff gepolstert sein. Die Außenseite der Sitze, d.h. die Flächen, die nicht von einer sitzenden Person bedeckt werden (also Unterseite und Rückseite), sollten möglicht reflektierend ausgelegt sein, um zusätzliche Absorption im Saal zu vermeiden.

Auch die Verkleidung der Orgel sollte aus möglichst reflektierendem Material bestehen; aus optischen Gründen z.B. aus Holz bzw. Holzfurnier. Da beim Aufbau der Verschalung des Orgelkorpus nicht so hohe Massenbeläge wie bei einer Wand angenommen werden können, ist mit einer absorbierenden Wirkung der Orgelverkleidung im tieffrequenten Bereich zu rechnen. Die in Kapitel 1.2.3 formulierte Forderung, dass zur Unterstützung des Direktschalls der Orgel die Oberflächen um die Orgel möglichst reflektierend ausgestaltet sein sollten, ist durch die entsprechende Ausgestaltung der Wände gegeben.

Insgesamt sollte die Oberflächen des Konzertsaals weitestgehend geschlossen sein; dies betrifft z.B. die Decke im Bereich der Beleuchtungsbrücke. Damit keine Schallenergie verloren geht, sind alle größeren Löcher und Schlitze unbedingt zu vermeiden.

3.3 Verifizieren des Entwurfs durch Computersimulation

Um die beschriebenen Maßnahmen mittels Computersimulation zu verifizieren, wurde mit EASE ein 3D-Modell des Orgel-Konzertsaals erstellt. Die Simulationen wurden wie in Kapitel 3 beschrieben durchgeführt.

3.3.1 EASE-Modell

Die Abbildung 3.16 zeigt das auf Grundlage des 3D-SketchUp-Modells entstandene EASE-Modell des Orgel-Konzertsaals. Das Modell besteht aus 1286 Flächen und hat ein Volumen von 7880 m³. Um den Oberflächen des Modells akustische Eigenschaften zuzuweisen, wurden auf der Grundlage der Materialdatenbank von EASE neue Materialien definiert und verwendet. Die Strukturierung der Wände und der Decke wurde ausmodelliert, so dass in diesen Bereichen keine zusätzlichen Streugrade für die Materialien definiert wurden.



Abbildung 3.16: Entwurf für den Orgel-Konzertsaal, EASE-Modell

Die Abbildung 3.17 zeigt den Absorptionsgrad des im unteren Wandbereich des Saales verwendeten Materials. Das Material ist lediglich im mittleren und tiefen Frequenzbereich leicht absorbierend und entspricht einem massiven Wandaufbau mit einer nahezu schallharten Holzverkleidung.

Auch die Wandverkleidung im oberen Saalbereich ist, wie in Abbildung 3.18 zu sehen, nahezu schallhart. Als Grundlage für das Material wurde Gipsputz auf einer massiven Wand verwendet.



Abbildung 3.17: Wandmaterial im unteren Saalbereich, Absorptionsgrad



Abbildung 3.18: Wandmaterial im oberen Saalbereich, Absorptionsgrad

Als Material für die Decke wurde grundsätzlich das gleiche Material wie im oberen Wandbereich angenommen. Die Abbildung 3.19 zeigt den frequenzabhängigen Absorptionsgrad des Deckenmaterials. Dem konstruktionsbedingt nicht so massiven Aufbau der Decke ist jedoch mit einem höheren Absorptionsgrad im tiefen Frequenzbereich Rechnung getragen.



Abbildung 3.19: Deckenmaterial, Absorptionsgrad

Für den Bodenbelag wurde auf ein Material aus der EASE Datenbank zurückgegriffen. Die Abbildung 3.20 zeigt den Absorptionsgrad des verwendeten Materials WOOD FLR, einem standardisierten Parkettbodenbelag.



Abbildung 3.20: Bodenbelag, Absorptionsgrad

Im Publikumsbereich wurde ebenfalls auf ein Material aus der EASE Datenbank zurückgegriffen. Der in der Abbildung 3.21 zu sehende Absorptionsgrad entspricht Publikum auf leicht gepolstertem Gestühl. Die Werte des Absorptionsgrades stimmen weitestgehend mit den in der Literatur (z.B. [Bar10, S.34], [Ber96, S.626]) angegebenen Werten überein.



Abbildung 3.21: Publikum, Absorptionsgrad

Der Orgelaufbau und die Umsetzung der Materialien für die Orgel im EASE-Modell wurde auf Grundlage der Angaben in [Zor76] und [Mei03, S.27] und in Zusammenarbeit mit ADA diskutiert und entwickelt.

Für die Orgelverkleidung wurde ein neues Material definiert, dessen frequenzabhängiger Absorptionsgrad in Abbildung 3.22 zu sehen ist. Durch die Verkleidung der Orgel mit einem nahezu schallharten Material (wahrscheinlich Holz oder Holzfurnier wie im unteren Saalbereich) kann im Mitten- und Höhenbereich von einer geringen schallabsorbierenden Wirkung ausgegangen werden. Da die Orgel jedoch hohl ist und einen nicht so hohen Massenbelag wie eine massive Wand hat, steigt der Absorptionsgrad zu den tiefen Frequenzen hin an.



Abbildung 3.22: Orgelverkleidung, Absorptionsgrad

Da die endgültige Gestaltung der Orgel zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht feststeht, wurde die in Abbildung 1.6 zu sehende, derzeitige Strukturierung und Verzierung nicht nachmodelliert. Stattdessen wurde ein frequenzabhängiger Streugrad definiert, der einer entsprechenden wahrscheinlichen Strukturierung und Verzierung der Orgel entspricht. Mit einer anzunehmenden Strukturtiefe von ca. 20 - 30 cm beginnt der streuende Bereich bei ca. 1000 Hz. Die Abbildung 3.23 zeigt den frequenzabhängigen Streugrad der Orgelverkleidung. Im Modell wurde die Orgel als hohler, offener "Kasten" konstruiert; dementsprechend sind die Prospektöffnungen der Orgel im Modell offen. Um den Orgelpfeifen und den technischen Einbauten im Orgelkörper Rechnung zu tragen, wurde das Innenvolumen um 40% reduziert. Im Inneren der Orgel wurde, wie in [Mei03, S.27] beschrieben, ein Absorptionsgrad von 0,5 angenommen.



Abbildung 3.23: Orgelverkleidung, Streugrad

Als Material für die beiden Fenster und die Türen im Modell wurden standardisierte Materialien aus der EASE Datenbank verwendet. Da die Fläche der Fenster und Türen mit 2% der gesamten Innenfläche sehr gering ist, spielen die Materialien für die Betrachtungen keine große Rolle. Die Tabelle 3.2 zeigt die prozentuale Verteilung der Materialien auf den Innenflächen im EASE-Modell. Fast 75% der Flächen sind als nahezu schallhart anzunehmen. Der Publikumsbereich bzw. das Gestühl stellt mit 10% die größte Absorptionsfläche dar.

Material	Anteil der Innenfläche
Wand, oberer Saalbereich	30%
Decke	21%
Bodenbelag	12%
Wand, unterer Saalbereich	12%
Publikum	10%
Orgelverkleidung	9%
Orgel innen	4%
Fenster, Türen	2%

Tabelle 3.2: Prozentuale Verteilung der Materialien im eigenen Entwurf

3.3.2 Raumakustische Simulationen im Modell

Die raumakustischen Simulationen im vorgestellten EASE-Modell wurden, wenn nicht anders beschrieben, mit dem Programmmodul Room Mapping und der AURA Berechnungsmethode durchgeführt. Die Sender und Empfänger sowie alle variablen Simulationsparameter wurden, wie in Kapitel 3 beschrieben, verwendet und eingestellt. Da die Berechnung des in 1.2.1 kurz vorgestellten Raumeindrucksmaßes R nicht in die Software EASE implementiert ist, kann es leider nicht zur Validierung des Konzertsaalentwurfs herangezogen werden. Das Nachweisen einer genügenden Halligkeit und Diffusität des Schallfeldes im Konzertsaal ist jedoch auch mit anderen raumakustischen Kriterien und Methoden möglich.

Um die Schallausbreitung im Orgel-Konzertsaal nachvollziehen und ggf. auftretende Echoeffekte lokalisieren zu können, wurde mit dem Programmmodul Ray Tracing zusätzlich eine Ray Tracing-Untersuchung im Modell durchgeführt. Zur Nachbildung der realen Quellen, d.h. Orgel und Orchester, wurden zusätzliche Sender im Modell platziert, zwei Sender an der Frontseite der Orgel sowie zwei Sender auf der Bühne. Die Ray Tracing-Untersuchung wurde, wie in [Ahn00] empfohlen, mit einer typischen Einstellung von 100 Strahlen pro Sender, einer Strahlenordnung von 5 und über eine Länge von 1000 ms durchgeführt. Die Abbildung 3.24 zeigt den entsprechenden EASE Programmdialog mit den genannten Werten.

🚻 Ray Tracing	×	
Loudspeaker Lspk Group	Rays per Loudspeaker: 100	
Trace Control by	Tracing Options	
Order: 5	Draw Trace <u>R</u> ays	
☑ <u>I</u> ime [ms]: 1000	Show <u>E</u> very Ray	
□ <u>L</u> oss [dB] : 60	🗖 Brief Ray Info	
Directed Emission	Make Trace <u>F</u> ile	
	OK Cancel	

Abbildung 3.24: Ray Tracing, Programmdialog

Zusätzlich wurden mit dem Programmmodul AURA Response Impulsantworten für ausgewählte Empfangsplätze im Zuschauerbereich berechnet. Anhand der Impulsantwort kann durch die Reflexionsmuster an den Empfangsplätzen anschaulich überprüft werden, ob störende Echoeffekte im Orgel-Konzertsaal zu erwarten sind. Als Quellen wurden wie bei der Ray Tracing-Untersuchung die Sender an der Frontseite der Orgel bzw. die zwei Sender auf der Bühne verwendet. Zum Berechnen der Impulsantwort wurden 2261000 Schallteilchen (Particles) verwendet; als Länge des berechneten Zeitfensters (Lenghts) wurden 3550 ms angegeben. Die Länge sollte, wie in [Ahn00] erwähnt, bei AURA Response in etwa der zu erwartenden Nachhallzeit entsprechen. Als Wert für den Streugrad wurde der Defaultwert von 20% übernommen, was einem Streugrad leicht strukturierter Oberflächen entspricht. Unter "Cut Off Order" ("Advanced Options") kann diejenige Reflexionsordnungszahl festgelegt werden, bei der der Übergang vom Spiegelschallquellen- zum Ray Tracing-Verfahren stattfindet. Hier wurde der Übergang bei Reflexionen 10ter Ordnung festgelegt. Die Abbildung 3.25 zeigt den EASE Programmdialog mit den genannten Werten.

M Aura Response Calculation	×				
Room Acoustic Calculation by AURA Module Version 3.0, (Analysis Utility for Room Acoustics) AURA Auralisation based on CAESAR algorithms developed by Aachen University (RWTH)					
Response Locations	Calculation				
Parameters					
Particles : High Resolution, Slow	2261000				
Length [ms] : Long	3550				
Default Value [%] for Surfaces without Scattering Data :					
Slightly Structured Surfaces	20				
Number of Calculation Threads :					
2 Threads	2				
Note: Computation time also depends on the number of faces and receivers					
Andvanced Options >>					
Ready for Simulation					
<< Back Next >> Start Simulation	Quit				

 ${\bf Abbildung} \ {\bf 3.25:} \ {\rm AURA} \ {\rm Response}, \ {\rm Programmdialog}$

3.3.3 Simulationsergebnisse

Die Abbildungen 3.26 und 3.27 zeigen die Histogramme (beispielhaft hier bei 1000 Hz) der durchgeführten AURA-Berechnung an den untersuchten Empfangsplätzen. Wie gefordert, sind die Histogramme über den gesamten Zeitbereich ausreichend dicht und konstant. Die absolute Anzahl der Treffer liegt in allen Fällen über der geforderten Mindestanzahl von 10 Treffern pro Intervall. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die durchgeführte Simulation mit einer ausreichenden Anzahl von Schallpartikeln gerechnet wurde und anhand der Simulationsergebnisse hinreichend gültige Aussagen getroffen werden können.



Abbildung 3.26: AURA Mapping, Histogramme

(c) EASE 4.3 / Charkov / 09.09.2010 23:49:08 / Holger Struchholz h struchholz



Abbildung 3.27: AURA Mapping, Histogramme

Nachhallzeit

Die Abbildung 3.28 zeigt das gemittelte Ergebnis der Nachhallzeit-Untersuchungen im Modell. Mit einem Einzahlwert von ca. 3 s liegt die bestimmte Nachhallzeit im geforderten Zielbereich. Bis ca. 2000 Hz ist die Nachhallzeit mit Abweichungen von ca. ± 0.2 s als nahezu konstant anzusehen. Über 2000 Hz sinkt die Nachhallzeit, bei 4000 Hz beträgt die Nachhallzeit noch 2,3 s, bei 8000 Hz noch 1,3 s.



(c) EASE 4.3 / Charkov / 09.09.2010 23:58:09 / Holger Struchholz h struchholz

Abbildung 3.28: EASE-Modell, gemessene Nachhallzeit

Die Abbildung 3.29 zeigen die maximal (blau) und minimal (grün) gemessenen Werte für die Nachhallzeit auf den untersuchten Empfangsplätzen. Wie in der Abbildung zu sehen, liegen die Unterschiede im Bereich von ± 0.1 s um den Mittelwert und sind als gering zu bewerten.



(c) EASE 4.3 / Charkov / 09.09.2010 23:58:44 / Holger Struchholz h struchholz

Abbildung 3.29: EASE-Modell, minimale und maximale gemessene Nachhallzeit

Die hohe Nachhallzeit ist auf das hohe Volumen und die überwiegend schallharten Oberflächen im Modell zurückzuführen. Die als Mitten- und Höhenabsorber wirksamen Publikumsflächen sind die größten und wirksamsten Absorptionsflächen im Saal. Wie in den Schaubildern zu sehen, haben sie den größten Einfluss auf den Frequenzverlauf der Nachhallzeit. Zusätzlich spielen mit zunehmender Frequenz die Verluste durch Luftdissipation eine Rolle.

Auffällig beim Frequenzverlauf der Nachhallzeit ist das etwas ungewöhnliche Absinken der Nachhallzeit im tieferen Frequenzbereich unter 500 Hz. Die Ursache hierfür ist bei den im Modell verwendeten Materialien für die Decke, den Boden und die Orgelverkleidung zu suchen. Diese sind mit insgesamt 42% der Flächen hauptsächlich als Tiefenabsorber wirksam und haben dadurch, auch bei relativ geringen Absorptionskoeffizienten von ca. 0,2, einen Einfluss auf den Frequenzgang. Durch den insgesamt mit einer Abweichung von $\pm 0,2$ s im Intervall zwischen 100 Hz und 2000 Hz recht glatten und konstanten Frequenzgang der Nachhallzeit ist im geplanten Orgel-Konzertsaal mit einem vollen, warmen Klang zu rechnen.

An dieser Stelle muss noch erwähnt werden, dass der Fokus der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen auf reinen Orgelkonzerten liegt. Wird das Orgelkonzert durch ein Orchester unterstützt, so ist aufgrund der absorbierenden Wirkung der Orchestermusiker auf der Bühne mit geringeren Nachhallzeiten zu rechnen. Da die empfohlenen Nachhallzeiten für klassische Orchestermusik jedoch ohnehin tiefer liegen, ist diese Tatsache nicht unbedingt als Problem zu werten. Vielmehr wird die leichte Senkung der Nachhallzeit den sakralen Charakter des Konzertsaals nicht grundlegend ändern, sondern lediglich die Hörsamkeit des Saales an die Anforderungen der Orchestermusik anpassen. Um die Größenordnung der Senkung der Nachhallzeit abschätzen zu können, wurde zur Simulation der Orchestermusiker als Material von $\frac{2}{3}$ der Bühnenfläche ein standardisiertes Publikumsmaterial verwendet. In der durchgeführten Simulation verringerte sich der Einzahlwert der bestimmten Nachhallzeit so um ca. 0,3 s.

C80

In Abbildung 3.30 ist das Ergebnis der im Modell durchgeführten C80-Untersuchung zu sehen. Berechnet man den Einzahlwert aus den gemittelten (braune Kurve) Ergebnissen, so ergibt sich für C80 ein Wert von -2,3 dB. Dieser liegt im geforderten Zielintervall von (-2 ± 2) dB. Aus der Abbildung geht auch hervor, dass die maximal und minimal (blaue und grüne Kurve) gemessenen C80-Werte im relevanten Frequenzbereich von 500 - 2000 Hz ebenfalls im geforderten Zielintervall liegen.

Die relativ tiefen Werte für das Klarheitsmaß C80 sind auf die hohen zu erwartenden Nachhallzeiten zurückzuführen. Wichtig ist hierbei, dass die später als 80 ms eintreffende Schallenergie aus möglichst diffusen Schallanteilen besteht und keine hörbaren Echoeffekte auftreten. Die Schwankungen im interessierenden Frequenzbereich von ca. ± 1 dB um den Mittelwert liegen im Bereich der Wahrnehmungsschwelle. Diese lassen sich auf die vom Empfangsplatz abhängigen Anteile von Direktschallenergie und diffuser Schallenergie zurückführen. Prinzipiell ist es so, dass je geringer der Abstand zwischen Empfangsplatz und einer Schallquelle, desto höher ist der zu erwartende Wert für C80.



(c) EASE 4.3 / Charkov / 10.09.2010 00:01:05 / Holger Struchholz histruchholz

Abbildung 3.30: EASE-Modell, Ergebnis der C80-Berechnung

Echokriterium

Um eventuell auftretende Echoeffekte im geplanten Orgel-Konzertsaal sichtbar zu machen, wurden im Modell Echokriterium-Untersuchungen durchgeführt. Die Abbildungen 3.31 und 3.32 zeigen die Ergebnisse dieser an den Empfangspositionen im Modell bei 1000 Hz.



Abbildung 3.31: EASE-Modell, Echokriterium



Abbildung 3.32: EASE-Modell, Echokriterium

Die maximal gemessenen Werte liegen im Bereich von ca. 0,8. Auch bei den anderen bestimmten Frequenzen zwischen 100 Hz und 10 kHz sind die Ergebnisse in ähnlichen Bereichen. Insgesamt liegen alle bestimmten Werte deutlich unter der kritischen Grenze von 1,5. Durch das Echokriterium lassen sich also keine störenden Echoeffekte im geplanten Orgel-Konzertsaal nachweisen.

Zu erklären ist dies im Wesentlichen mit den durchgehenden Strukturierungen der Wände und der Decke. Mit den gewählten Abmessungen wirken die Strukturen jedoch hauptsächlich im hohen und mittleren Frequenzbereich. Die ebenfalls guten Ergebnisse im tiefen Frequenzbereich sind auf den insgesamt aufgelockerten Innenausbau des Saales zurückzuführen. Zu nennen sind hier Strukturen mit den Abmaßen von einigen Metern, wie der Zuschauerbalkon, der Orgelkasten oder die stufige Deckenstruktur.

Impulsantwort

Die guten Ergebnisse der Echokriterium-Untersuchungen werden durch die im Modell berechneten Impulsantworten gestützt. Die Abbildungen 3.33 und 3.34 zeigen die mittels AURA Response berechneten Impulsantworten. Wie eingangs beschrieben, wurden die Impulsantworten für zwei unterschiedliche Senderszenarien (Orgel und Bühne) an ausgewählten Empfangsplätzen im Zuschauerbereich berechnet.

In den Impulsantworten, bei denen die Sender an der Vorderseite der Orgel angebracht waren, sind keine energiereichen Reflexionen zu erkennen, die später als 50 ms nach den ersten Signalen auf den Empfangsplätzen eintreffen. Ähnliches lässt sich für die Impulsantworten sagen, bei denen die Sender auf der Bühne positioniert waren. Auch hier treffen der Direktschall und die ersten energiereichen Reflexionen innerhalb der ersten

66 3 Umsetzung

50 ms an den Empfangsplätzen ein. Echoeffekte sind anhand dieser Impulsantworten nicht auszumachen, vielmehr sprechen die überwiegend gleichmäßig abnehmenden und zeitlich dichten Reflexionen in der Impulsantwort für ein diffuses Schallfeld.



Abbildung 3.33: EASE-Modell, Impulsantworten, Sender an der Orgelvorderseite



Abbildung 3.34: EASE-Modell, Impulsantworten, Sender auf der Bühne

Ray Tracing

Die Abbildung 3.35 und 3.36 zeigen die Ergebnisse der Ray Tracing-Untersuchungen für die Senderszenarien Orgel und Bühne. Im direkten Vergleich der beiden Abbildungen fällt auf, dass die Reflexionsmuster der Sender, die an der Vorderseite der Orgel platziert wurden, weniger dicht als die Reflexionsmuster der beiden Sender auf der Bühne sind. Dies ist auf den hohlen Aufbau der Orgel im Modell zurückzuführen. Einige der Schallteilchen werden direkt in die Orgel abgestrahlt, sind dort über mehrere Reflexionen "gefangen" und werden nicht oder erst nach einigen Reflexionen wieder in den Raum abgestrahlt.


Abbildung 3.35: EASE-Modell, Ray Tracing, Sender an der Orgelvorderseite



Abbildung 3.36: EASE-Modell, Ray Tracing, Sender auf der Bühne

In beiden Abbildungen sind keine deutlich ausgeprägten Schallkonzentrationen und auffällige, ungünstige Reflexionspfade zu beobachten. Die gefalteten und strukturierten Seitenwände sorgen in beiden Simulationsszenarien dafür, dass sich die Schallteilchen im gesamten Raum ausbreiten; die Entstehung eines gleichmäßigen und diffusen Schallfeldes wird unterstützt. Durch die Ausrichtung der Flächen der Seitenwände und Balkonbrüstung werden die Schallstrahlen vermehrt in den oberen Saalbereich gelenkt, um das gesamte Saalvolumen zum Aufbau des Nachhalls zu nutzen.

4 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse und Fazit

4.1 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass mit den in 3.2.1 und 3.2.2 beschriebenen Maßnahmen eine Hörsamkeit im geplanten Orgel-Konzertsaal erzeugt werden kann, die den in Kapitel 1.2 formulierten Vorgaben entspricht. Die beiden bestimmten raumakustischen Kriterien liegen mit ca. 3 s für die Nachhallzeit und -2,3 dB für C80 innerhalb der geforderten Zielintervalle. Die mit 3 s relativ lange Nachhallzeit ermöglicht eine den Hörgewohnheiten entsprechende Aufführung von Orgelkonzerten und verleiht dem Konzertsaal einen sakralen Charakter. Die niedrigen Werte von C80 sprechen für einen relativ hohen Anteil diffuser Schallenergie im Raum, die bei den Zuhörern das Gefühl erzeugt, von der Musik eingehüllt zu sein.

Durch die mit unterschiedlichen Abmaßen strukturierte Ausformung der möglichst schallhart ausgelegten Wand- und Deckenflächen wird der Schall breitbandig diffus reflektiert. Die Entstehung von Flatterechos durch parallel stehende Wände oder eine direkte Rückreflexion auf die Bühne (sog. Theaterecho) kann so vermieden werden. So konnten mittels der durchgeführten Echokriterium-Untersuchungen keine Hinweise auf störende Echoeffekte gefunden werden. Auch anhand der berechneten Impulsantworten an repräsentativen Empfangsplätzen wurden keine auffälligen energiereichen Spätreflexionen festgestellt. Diese Aussage ist auch durch die durchgeführte Ray Tracing-Untersuchung im Modell gestützt. Anhand der Untersuchung konnten keine Schallkonzentrationen oder ungünstige Reflexionsmuster aufgedeckt werden. Vielmehr ist zu erkennen, dass das gesamte Volumen des Orgel-Konzertsaals durch gestreute Reflexionen zum Aufbau eines diffusen Schallfeldes genutzt wird.

Ein weiterer Hinweis für ein ausgeglichenes und diffuses Schallfeld im Konzertsaal ist die insgesamt geringe Varianz der an verschiedenen Stellen im Modell ermittelten raumakustischen Kriterien. Die örtlichen Unterschiede der Nachhallzeit und des Klarheitsmaßes C80 liegen hier im Bereich der Wahrnehmungsschwellen. An dieser Stelle soll noch einmal auf die durch die Simulation eventuell auftretenden Ungenauigkeiten der Ergebnisse hingewiesen werden. Da es mitunter schwierig ist, Absorptionsgrade und Streugrade von Materialien und Wandaufbauten abzuschätzen, können bei falscher Einschätzung oder ungenauen Angaben in Herstellerdatenblättern systematische Simulationsfehler auftreten, die erheblich sein können. Zusätzlich sind die verfahrensbedingten Ungenauigkeiten im tiefen Frequenzbereich beim Bewerten der Ergebnisse zu beachten. Verlässliche Aussagen können hier nur unter Vorbehalt gemacht werden.

Positiv ist zu bewerten, dass die ermittelten Werte der raumakustischen Kriterien überwiegend im mittleren Bereich der vorgegebenen Zielintervalle liegen. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass die durch die Computersimulation bedingten eventuell auftretenden Abweichungen zwischen Simulation und Realität die Kriterien nicht zwangsläufig aus dem jeweiligen Zielintervall "schieben". So können auch die realen Raumparameter wie Absorptionsgrade oder Abmaße innerhalb gewisser Toleranzen von den Annahmen im Computermodell abweichen, ohne dass die raumakustischen Kriterien direkt außerhalb der Zielintervalle liegen.

4.2 Fazit

Mit dieser Arbeit habe ich die Planung und Realisierung eines Innenraumaufbaus für den Orgel-Konzertsaal in Charkow dokumentiert, der die in Kapitel 1.2 formulierten raumakustischen und innenarchitektonischen Vorgaben erfüllt.

Die raumakustische Planung wurde anhand eines 3D-Computermodells unter der Verwendung der akustischen Simulationssoftware EASE in der Version 4.3 durchgeführt. Wie in Kapitel 2 anhand der Studien [Bor05a], [Bor05b] und [Bor02] beschrieben, bieten die Berechnungen bei sorgfältiger Anwendung eine ausreichend genaue Planungssicherheit, d.h. die Unterschiede zwischen Messungen im Computermodell und realen Messungen liegen unterhalb oder im Bereich der Wahrnehmungsschwellen.

Potenzielle Fehler sind jedoch bei akustischen Simulationen, die auf geometrischer Raumakustik beruhen, verfahrensbedingt im tiefen Frequenzbereich zu finden. Der Frequenzbereich kleiner 100 Hz kann nicht zuverlässig abgebildet werden und je nach Abmessungen der Begrenzungsflächen in einem Modell hat auch der Frequenzbereich kleiner 250 Hz nur orientierenden Charakter. Effekte wie Beugung oder das Auftreten von Raummoden, die sich nur mit wellentheoretischer Raumakustik abbilden lassen, können ebenfalls nicht in die Betrachtungen mit einbezogen werden. Zur Vermeidung systematischer Simulationsfehler, also Fehler, die auf falsche Ausgangsdaten zurückzuführen sind, müssen bei der Konstruktion des Computermodells neben den korrekten Raumabmaßen auch die raumakustischen Parameter wie Absorptionsgrade und Streugrade des Saales möglichst der Realität entsprechen. Da die Absorptionsgrade von Materialien von vielen Parametern wie z.B. dem Wandaufbau abhängig sind, ist das Abschätzen korrekter Absorptionsgrade auch mit den Datenblättern der Hersteller mitunter schwierig. Diese potenzielle Fehlerquelle lässt sich letztendlich nur mit der Erfahrung des Anwenders ausgleichen. Darüber hinaus ist das fachkundige Einstellen der Simulationsparameter und die insgesamt richtige Anwendung der Simulationssoftware selber eine Voraussetzung für - im genannten Rahmen - richtige und gute Simulationsergebnisse. Da ich die Arbeit in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro ADA durchführen konnte, habe ich bei allen auftretenden Fragen Rücksprache mit erfahrenen Akustikingenieuren halten können und konnte so potenzielle Fehler vermeiden.

Unter den genannten Voraussetzungen und mit dem Wissen um die eventuellen Ungenauigkeiten der Simulationsergebnisse sowie der heute zur Verfügung stehenden Rechenleistung, stellt die raumakustische Planung anhand einer computergestützen Simulation eine gängige und geeignete Methode dar und gewährleistet eine ausreichend genaue Planungssicherheit.

Das akustische Gutachten mit dem im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Entwurf für den Orgel-Konzertsaal in Charkow wurde dem Auftraggeber im Mai 2010 übergeben. Anfang Juli wurde der Vorschlag mit einigen kleinen Änderungswünschen akzeptiert. Die Fertigstellung des Orgel-Konzertsaals ist für das Jahr 2013 geplant.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Geplanter Gebäudekomplex, gerenderte Außenansicht	2
1.2	Geplanter Gebäudekomplex, gerenderte Außenansicht	3
1.3	Rohbau, Grundriss	4
1.4	Rohbau, Längsschnitt	5
1.5	Rohbau, einfaches EASE-Modell	6
1.6	Geplante Orgel, SketchUp-Modell	7
1.7	Erstentwurf des Orgel-Konzertsaals, Schnittperspektive	8
1.8	Erstentwurf des Orgel-Konzertsaals, Blick auf die Orgel	8
1.9	Erstentwurf des Orgel-Konzertsaals (gelb) und Rohbau (schwarz), Volumen-	
	vergleich	9
1.10	Empfohlene Nachhallzeit in Abhängigkeit von Volumen und Nutzungsprofil	11
1.11	Nachhallzeiten bei mittleren Frequenzen in gotischen Kirchen in Abhängig-	
	keit vom Raumvolumen [Mei03, S.95]	11
1.12	Nachhallzeiten bei mittleren Frequenzen in neugotischen Kirchen in Abhän-	
	gigkeit vom Raumvolumen [Mei03, S.123]	12
1.13	Nachhallzeiten bei mittleren Frequenzen in Barockkirchen in Abhängigkeit	
	vom Raumvolumen [Mei03, S.115]	12
1.14	Empfohlene Nachhallzeiten in Abhängigkeit vom Raumvolumen $[{\rm Zor}76]$	13
1.15	Empfohlene Nachhallzeiten in besetzten Kirchen in Abhängigkeit vom Raum-	
	volumen. CM: Cremer u. Müller, Z: Zorkoczy, KZ: Kaufmann u. Zemke, KH:	
	Knudsen u. Harris [Mei03, S.144]	13
1.16	Empfohlene Nachhallzeiten in unbesetzten Kirchen in Abhängigkeit vom	
	Raumvolumen. CM: Cremer u. Müller, H: Hartmann, KZ: Kaufmann u.	
	Zemke [Mei03, S.145]	14
1.17	Anzustrebende Nachhallzeit	15
1.18	Akustisch günstige Ausgestaltung der Decke [Ahn08, S.219]	19
1.19	Einbautiefe $D,$ Höh e H und Öffnungswinkel Θ für einen Balkon [Bar 10, S.56]	20
1.20	Schallreflexionen an ebenen Flächen mit Oberflächenstruktur [Wei08, S.227]	21
0.1		
2.1	Ubersicht über die normierten Berechnungsfehler der untersuchten Software-	~-
	pakete [Bor05b]	27
2.2	EASE, Edit Projekt-Fenster	28
2.3	EASE, Materialeditor	29
2.4	EASE, Evaluerungstenster	30

2.5	EASE, Ray Tracing-Untersuchung	31
2.6	EASE, Histogramm	37
0.1		40
3.1	AURA Mapping, Programmdialog	40
3.2	Erstentwurf des Orgel-Konzertsaals, EASE-Modell	41
3.3	Erstentwurf des Orgel-Konzertsaals, Nachhallzeit	42
3.4	Erstentwurf des Orgel-Konzertsaals, C80	43
3.5	Entwurf für den Orgel-Konzertsaal, Schnittperspektive	44
3.6	Entwurf für den Orgel-Konzertsaal, Blick auf die Orgel	45
3.7	Entwurf für den Orgel-Konzertsaal, Grundriss Parkettebene	46
3.8	Entwurf für den Orgel-Konzertsaal, Grundriss Rangebene	47
3.9	Entwurf für den Orgel-Konzertsaal, Längsschnitt	47
3.10	Entwurf für den Orgel-Konzertsaal, Blick von der Bühne in den Saal	48
3.11	Wandstruktur im unteren Saalbereich	50
3.12	Wandstruktur im unteren Saalbereich	50
3.13	Wandelement im oberen Saalbereich	51
3.14	Wandstruktur im oberen Saalbereich	51
3.15	Deckenstruktur	52
3.16	Entwurf für den Orgel-Konzertsaal, EASE-Modell	54
3.17	Wandmaterial im unteren Saalbereich, Absorptionsgrad	55
3.18	Wandmaterial im oberen Saalbereich, Absorptionsgrad	55
3.19	Deckenmaterial, Absorptionsgrad	55
3.20	Bodenbelag, Absorptionsgrad	56
3.21	Publikum, Absorptionsgrad	56
3.22	Orgelverkleidung, Absorptionsgrad	57
3.23	Orgelverkleidung, Streugrad	57
3.24	Ray Tracing, Programmdialog	59
3.25	AURA Response, Programmdialog	60
3.26	AURA Mapping, Histogramme	61
3.27	AURA Mapping, Histogramme	61
3.28	EASE-Modell, gemessene Nachhallzeit	62
3.29	EASE-Modell, minimale und maximale gemessene Nachhallzeit	62
3.30	EASE-Modell, Ergebnis der C80-Berechnung	64
3.31	EASE-Modell, Echokriterium	64
3.32	EASE-Modell, Echokriterium	65
3.33	EASE-Modell, Impulsantworten, Sender an der Orgelvorderseite	66
3.34	EASE-Modell, Impulsantworten, Sender auf der Bühne	66
3.35	EASE-Modell, Ray Tracing, Sender an der Orgelvorderseite	67
3.36	EASE-Modell, Ray Tracing, Sender auf der Bühne	67

Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht über die untersuchten Kriterien und die differentiellen Wahrnehm-	
	barkeitsschwellen (JND) [Bor05b]	26
3.1	Prozentuale Verteilung der Materialien im Erstentwurf	41
3.2	Prozentuale Verteilung der Materialien im eigenen Entwurf	58

Literaturverzeichnis

- [ADA] ADA. "Acoustic Design Ahnert GmbH". URL http://www.ada-acousticdesign.de/.
- [Ahn00] Ahnert, W. (2000): Tutorial für EASE 4.0, SDA. URL http://www.sda.de/.
- [Ahn08] Ahnert, W.; Tennhardt, H. (2008): Raumakustik. In: Weinzierl, Stefan (Hg): Handbuch der Audiotechnik. S.181-266. Berlin: Springer.
- [Ahn09] Ahnert, W. (2009). "Raum- und Bauakustische Analyse Charkow".
- [Aut] Autodesk. "Autodesk AutoCAD". URL http://www.autodesk.de/.
- [Bar10] Barron, M. (2010): Auditorium Acoustics and Architectural Design. New York: Spon Press.
- [Ber96] Beranek, L. (1996): Concert and Opera Halls How They Sound. American Institute of Physics.
- [Ber03] Beranek, L. (2003): Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture. Springer.
- [Bor02] Bork, I. (2002): Simulation and Measurement of auditorium acoustics the round robin tests on acoustical simulation. Tech. report, Institute of Acoustics Vol. 24, PTB Braunschweig.
- [Bor05a] Bork, I. (2005): "Report on the 3rd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation - Part I: Measurements". In AActa Acustica united with Acustica, Volume 91, Number 4, S.740-752.
- [Bor05b] Bork, I. (2005): "Report on the 3rd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation - Part II: Calculations". In AActa Acustica united with Acustica, Volume 91, Number 4, S.753-763.
- [Cre78] Cremer, L.; Müller, H. (1978): Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik Bd. 1. Stuttgart: Hirzel.
- [Dad85] Dadoun, N.; Kirkpatrick, D.G.; Walsh, J.P. (1985): "The geometry of beam tracing". In Proceedings of the first annual Symposium on Computational Geometry, S.55-61.
- [Die86] Dietsch, L.; Kraak, W. (1986): "Ein objektives Kriterium zur Erfassung von Echostörungen bei Musik- und Sprachdarbietungen". In Acustica, Volume 60, S.205-216.

- [Fei07] Feistel, S.; Ahnert, W.; Miron, A.; et al. (2007): "Improved Methods for Calculating Room Impulse Responses with EASE 4.2 AURA". In 19th Int. Congress on Acoustics.
- [gmp] gmp. "Architekturbüro gmp, von Gerkan, Marg und Partner". URL http://www.gmp-architekten.de/.
- [Goo] Google. "Google SketchUp". URL http://sketchup.google.com/intl/de/.
- [Har82] Hartmann, G. (1982): "Über den optimalen Nachhall in kleinen bis mittelgroßen Kirchen". In Applied Acoustics 15, S.41-48.
- [Höh95] Höhne, R.; Schroth, G. (1995): "Zur Wahrnehmbarkeit von Deutlichkeits- und Durchsichtigkeitsunterschieden in Zuhörersälen". In Acustica, Volume 81, S.309-319.
- [Kau69] Kaufmann, G.; Zemke, H.J. (1969). "Raumakustische Kompromisse für Sprache und Musik in Kirchen".
- [Kir78] Kirszenstein, J. (1978): "An image source computer model for room acoustics analysis and electroacoustic simulation". In *Appl. Acoust.* 17, S.275.
- [Knu50] Knudsen, V.; Harris, C. (1950): Acoustical Designing in Architecture. John Wiley & Sons Inc.
- [Kuh78] Kuhl, W. (1978): "Räumlichkeit als Komponente des Raumeindrucks". In Acustica 40, S.167-181.
- [Leh74] Lehmann, U. (1974). "Untersuchungen zur Bestimmung des Raumeindrucks bei Musikdarbietungen und Grundlagen der Optimierung".
- [Mei03] Meier, J. (2003): Kirchenakustik. Frankfurt/Main: Erwin Bochinski.
- [Mös07] Möser, M. (2007): Technische Akustik, 7. Auflage. Berlin: Springer.
- [Rei75] Reichardt, W.; Alim, O.A.; Schmidt, W. (1975): "Definitionen und Meßgrundlage eines objektiven Maßes zur Ermittlung der Grenze zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit bei Musikdarbietungen". In Acustica 32, S.126-137.
- [Sch] Schuke, A. "Alexander Schuke Potsdam-Orgelbau GmbH". URL http://www.schuke.com/.
- [Sch01] Schmitz, O.; Feistel, S.; Ahnert, W.; et al. (2001): "Merging software for sound reinforcement systems and for room acoustics". In *110th AES Convention*.
- [SDA] SDA. "Software Design Ahnert GmbH". URL http://www.sda-softwaredesign.de/.
- [Vor88] Vorländer, M. (1988): "Ein Strahlenverfolgungsverfahren zur Berechnung von Schallfeldern in Räumen". In Acustica 65, S.138.

- [Vor89] Vorländer, M. (1989): "Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm". In J. Acoust. Soc. Am. 86, S.172.
- [Vor08] Vorländer, M. (2008): Auralization. Berlin: Springer.
- [Wei08] Weinzierl, S. (2008): Handbuch der Audiotechnik. Berlin: Springer.
- [Zor76] Zorkoczy, L. (1976): Hörsamkeit in Kirchen. Tech. report, Verlag Merseburger, Berlin.