

## Technische Universität Berlin

Fakultät I - Geisteswissenschaften Fachgebiet Audiokommunikation

# Bachelorarbeit

# RAUMAKUSTISCHE OPTIMIERUNG DER SCHULAULA DES Heinz-Berggruen Gymnasiums in Berlin

Artur Paszkiewicz



### Technische Universität Berlin

Fakultät I - Geisteswissenschaften Fachgebiet Audiokommunikation

Bachelorarbeit

# RAUMAKUSTISCHE OPTIMIERUNG DER SCHULAULA DES Heinz-Berggruen Gymnasiums in Berlin

Vorgelegt von:Artur PaszkiewiczErstgutachter:Prof. Dr. Stefan WeinzierlZweitgutachter:Dr.-Ing. Roman Tschakert

Berlin, 2. Februar 2017

## Zusammenfassung

In Räumen mit musikalischen Anforderungen ist die akustische Planung ein bedeutungsvoller Aspekt, um den Zuhörenden von Musikereignissen ein Klangerlebnis darbieten zu können. Werden in vorhanden Räumen fehlerhafte akustische Effekte durch die Zuhörenden wahrgenommen, können die Ursachen der Problematik unter Zuhilfenahme einer raumakustischen Messung herausgefunden werden und durch entsprechende Maßnahmen in der Raumungestaltung gelöst werden. Zur Lösungsfindung können Maßnahmen unter Verwendung einer Computersimulation bewertet werden.

Angesichts einer unzufriedenen wahrgenommen Raumakustik in der Schulaula des Heinz-Berggruen Gymnasiums in Berlin wird eine raumakustische Optimierung durchgeführt. Hierzu wurde eine raumakustische Messung durchgeführt, um unter Zuhilfenahme verschiedener raumakustischen Parameter die Problematik festzustellen.

Es ergaben sich Maßnahmen, die unter Verwendung einer akustischen Simulation mit der Software RAVEN bewertet werden konnten und deren Beitrag zur Lösung der raumakustischen Problematik der Schulaula festgestellt werden konnten. Unter Rücksichtnahme diverser Einschränkungen der akustischen Computersimulation können die aufgedeckten Maßnahmen in der Schulaula des Heinz-Berggruen Gymnasiums zur Verbesserung der raumakustischen Bedingungen verwirklicht werden.

# Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und eigenhändig, sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Ort, Datum

Unterschrift

## Danksagung

Ich möchte allen danken, die mich während dieser Arbeit unterstützt haben. Ein großer Dank geht an Herrn Dr. Roman Tschakert, für seine Begleitung während der ganzen Bachelorarbeit. Ich danke Herrn Professor Dr. Stefan Weinzierl als betreuenden Professor. Des Weiteren gebühre ich einen Dank an David Ackermann, Christoph Böhm und Fabian Brinkmann, die mir jeder Zeit mit ihrem Fachwissen zur Seite standen und bei Schwierigkeiten mit RAVEN weitergeholfen haben. Ich danke ebenfalls dem Team des Fachgebietes Audiokommunikation zur Bereitstellung der Messtechnik und allen Mitarbeitern des Fachgebietes Technische Akustik.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern und meiner Schwester, die mich tatkräftig während meines ganzen Studiums und der Bachelorarbeit unterstützt haben.

Das größte Dankeschön geht an meine Freundin, die jederzeit an meiner Seite stand und mich in jeder Situation ermutigt hat.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei meinen Freunden.

# Inhaltsverzeichnis

Er	kläru	ng		VI
Da	nksa	gung		VIII
Ab	okürz	ungsver	zeichnis	XIII
1.	Einl	eitung		1
2.	Theo	oretisch	e Grundlagen	3
	2.1.	Rauma	kustische Parameter	3
		2.1.1.	Nachallzeit und Anfangsnachhallzeit	4
		2.1.2.	Bassverhältnis	6
		2.1.3.	Klarheitsmaß	6
		2.1.4.	Schwerpunktzeit	7
		2.1.5.	Seitenschallgrad	7
		2.1.6.	Stärkemaß	8
	2.2.	Raums	imulation	8
		2.2.1.	Deterministische Spiegelschallquellenmethode	9
		2.2.2.	Stochastisches Ray Tracing	10
		2.2.3.	Hybride Verfahren	11
		2.2.4.	Absorptions - und Streugrad	11
3.	Rau	makusti	ische Messung	13
	3.1.	Durchf	ührung der Messung	13
	3.2.	Auswe	rtung der Messung	16
	3.3.	Beurtei	ilung der Raumakustik	23
4.	Rau	makusti	ische Simulation mit RAVEN	25
	4.1.	RAVE	N Konfiguration	25

#### Inhaltsverzeichnis

	4.2.	RAVEN Durchführung	30
	4.3.	RAVEN Simulation des Grundmodels	31
5.	Opti	mierung der Raumakustik	37
	5.1.	Optimierungsmaßnahmen	37
	5.2.	Ergebnisse der Optimierungsmaßnahmen	39
6.	Zusa	ammenfassung und Diskussion	47
Ab	bildu	ngsverzeichnis	53
Ta	beller	iverzeichnis	56
Lit	teratu	ırverzeichnis	59
A.	Anh	ang	61
	A.1.	Plots	61
	A.2.	Werte	70
	A.3.	Fotos	72
	A.4.	Aufbau des Datenträgers	74

# Abkürzungsverzeichnis

BR	Bassverhältnis
C <sub>80</sub>	Klarheitsmaß
EDT	Anfangsnachhallzeit
G	Schwerpunktzeit
L <sub>pE,10</sub>	Schalldruck-Wirkpegel
LF	Seitenschallgrad
RAVEN	Room Acoustics for Virtuell Environments
SketchUp	CAD-Software
T <sub>20</sub>	Nachhallzeit
T <sub>s</sub>	Schwerpunktzeit

## 1. Einleitung

Musikdarbietungen sollen für das Publikum ein Klangerlebnis darstellen. Um dies zu verwirklichen, müssen die akustischen Eigenschaften eines Raumes für die vorgegebene Nutzung zutreffen. Schon in den Jahren vor Christi verwendeten römische Architekten akustische Prinzipien, um die Akustik von Konzertsälen durch architektonische Maßnahmen positiv zu beeinflussen (Ahnert und Tennhardt, 2008). Hierbei entscheidet das Zusammenspiel der Primär- und Sekundärstruktur eines Raumes über die akustische Wirksamkeit auf den Zuhörer.

Diese akustische Wirksamkeit ist für das Publikum von Musikdarbietungen in der Schulaula des Heinz-Berggruen Gymnasiums in Berlin nicht zufriedenstellend. Durch unzureichende Raumeigenschaften werden akustische Darbietungen als mangelhaft empfunden. Die Zuhörenden leidet darunter. Die Schulaula ist ein Bau der späten fünfziger Jahre und besitzt einen rechteckigen Grundriss. Die Schulaula hat eine Länge von 25 m und eine Breite von 15 m. An den Seiten des Raumes befinden sich jeweils sechs Fenster. Die Rückwand ist im oberen Bereich mit einem Stoffbezug ausgekleidet, welcher die dahinter liegende Wärmedämmung verdeckt. Die restlichen Wände sind mit Holzplatten versehen. An allen Wänden sind Holzstäbe vorgesetzt worden. Die Aula wird mit einer konkaven Decke mit dem Radius von 4,8 m geschlossen. Sie erreicht ein Volumen von 1746 m<sup>3</sup>. In ihr befindet sich eine Bestuhlung für 240 Person.

In der vorliegenden Arbeit wird eine raumakustische Optimierung der Schulaula des Heinz-Berggruen Gymnasiums durchgeführt, um als Ziel eine Beurteilung der dargebotenen Maßnahmen zur Verbesserung der akustischen Wirksamkeit vorzulegen. In Abhängigkeit des Nutzungsprofils der Schulaula, muss eine für die Nutzung der Schulaula entsprechende angemessene Nachhallzeit vorliegen. Die Versorgung der Zuhörenden mit Direktschall und frühen Reflexionen muss gewährleistet sein. Das Räumlichkeitsempfinden sollte durch seitliche Reflexionen erhöht werden und jegliche Art von Echos sollten unterbunden werden (Vorländer und Witew, 2009).

Um zu prüfen, ob diese Ziele erreicht werden, werden zur Charakterisierung der Akustik raumakustische Kenngrößen verwendet. Die Verwendung der ausgewählten raumakustischen Parameter führt nach DIN EN ISO 3382 (2009) zu einer ausgiebigen Darstellung der akustischen Wirksamkeit des Raumes, da für jeden subjektiven Zuhöreraspekt ein Gütemaß auserwählt wurde.

Zur Bewertung der derzeitigen Raumakustik wird eine raumakustische Messung durchgeführt, die Aufschluss über die Problematik ergibt. Aus den Ergebnissen können Gründe, die zur fehlenden akustischen Wirksamkeit des Raumes beitragen, aufgedeckt werden.

Anhand des Nutzungsprofils der Schulaula werden im Anschluss Möglichkeiten benannt, um die festgestellte Problematik mit Hilfe einer Umgestaltung der Sekundärstruktur zu lösen. Die Überprüfung der Optimierungsmaßnahmen wird anhand einer Computersimulation durchgeführt. Dazu wird ein 3D-Modell der Schulaula erstellt. Das Modell wird entsprechend den dargebotenen Maßnahmen umgebaut.

Das anschließende Ergebnis der Computersimulation beinhaltet alle, zur Charakterisierung der Raumakustik, in dieser Arbeit verwendeten Kenngrößen. Der abschließende Vergleich der Ergebnisse zum ursprünglichen Zustand der Schulaula ermöglicht eine Beurteilung der Optimierungsmaßnahmen, hinsichtlich ihres Einflusses auf die Veränderung der akustischen Wirksamkeit der Schulaula.

# 2. Theoretische Grundlagen

Das Ziel dieser Optimierung besteht darin, eine zufriedenstellende Hörsamkeit der Schulaula zu erreichen. Die Hörsamkeit ist abhängig von zahlreichen Einflussfaktoren, dabei spielt der Direktschall, der Nachhall und die Reflexionen eine wichtige Rolle (Werner, 2009). Diese werden durch die Primärstruktur, also die Geometrien und die Sekundärstruktur, folglich der Raumgestaltung, beeinflusst. Die DIN 18041 (2016, S.6) beschreibt die Hörsamkeit, als "Eignung eines Raumes für bestimmte Schalldarbietungen, insbesondere für angemessene sprachliche Kommunikation und musikalische Darbietungen an den für die Nutzung des Raumes vorgesehene Orten".

Das Musizieren in der Schulaula des Heinz-Berggruen Gymnasiums kennzeichnet ihre Hauptnutzung. Hierfür finden neben der Deutlichkeit, der Nachhallzeit und dem Stärkemaß, auch Faktoren wie der Raumeindruck und die Klangfarbe ihren Gebrauch zur Bewertung wieder (Vorländer und Witew, 2009). Die in dieser Arbeit verwendeten Bewertungsgrößen werden im Abschnitt 2.1 genauer erläutert.

Um das Ziel dieser Arbeit zu erreichen, wird mittels einer Computersimulation die Raumgestaltung so angepasst, dass eine zufriedenstellende Akustik für den Zuhörer herrscht. Der zugrundeliegende theoretische Hintergrund wird im Abschnitt 2.2 veranschaulicht.

#### 2.1. Raumakustische Parameter

Basierend auf mehreren Gütemerkmalen soll eine Hörerwartung entsprechend der Raumakustik für die Zuhörer erreicht werden. Diese Gütemerkmale weisen, je nach Raumnutzung für ein gutes Hörerlebnis, einen zufriedenstellenden Wert auf und berücksichtigen eine gewisse subjektive Beurteilung des Hörers (Werner, 2009). Unterteilt werden die raumakustischen Parameter in Zeit - und Energiekriterien, denn einerseits werden Prozesse zeitlich im Ausklingverhalten bewertet und andererseits energetische Anteile betrachtet (Ahnert und Tennhardt, 2008).

Die Bestimmung der raumakustischen Parameter eines Raumes erfolgt mittels der Raum-

impulsantwort. Diese ist der zeitliche Verlauf des Schalldruckpegels an einem Zuhörerplatz, nachdem der Raum mit einem Schallimpuls angeregt wurde. Eine schematische Raumimpulsantwort ist in Abbildung 2.1 zu sehen. Sie impliziert den Direktschall und den gesamten Einfluss des Raumes durch seine Form und Oberflächengestaltung auf die Raumakustik. Der Raumeinfluss setzt sich zusammen aus den Anfangsreflexionen, dem Nachhall und ggf. störenden spätere Reflexionen die an einem Zuhörerort ankommen.

Hierbei sorgen die Anfangsreflexionen für den Höreindruck und die Klarheit des Raumes. Im Gegensatz dazu, bewirken spätere Reflexionen eine Halligkeit und sorgen für den Raumeindruck. Zur optimalen raumakustischen Planung ist es notwendig zu wissen, welche Reflexionen für den Zuhörer nützlich sind und welche wiederum zu einem Störempfinden beitragen. Bei Räumen für musikalische Darbietungen findet sich nach Fasold und Veres (2003) keine Zeitgrenze für störende Reflexionen wieder, eher ist ein Grenzbereich einzuhalten, sodass ein Gleichgewicht zwischen frühen und späten Reflexionen herrscht. Bei der Planung wird ein Wert von 80 ms als Grenzwert zwischen frühzeitigen Reflexionen und dem Nachhallbereich beachtet.

Verzögert sich eine Reflexion dennoch und besitzt dazu einen zum Direktschall vergleichbar hohen Schalldruckpegel, wirkt sie auf den Zuhörer störend.



Abbildung 2.1.: Schematische Raumimpulsantwort. Abbildung aus Vorländer und Witew (2009)

#### 2.1.1. Nachallzeit und Anfangsnachhallzeit

In Abbildung 2.1 sind die unterschiedlichen Bereiche der Raumimpulsantwort kenntlich gemacht. Der letztere Teil zeigt den Nachhallbereich. Der Nachhall eines Raumes entsteht da-

#### 2.1. Raumakustische Parameter

durch, dass die Flächen des Raumes den abgestrahlten Schall immer wieder zurückwerfen. Diese Rückwürfe erreichen den Zuhörer im Vergleich zum Direktschall, zeitlich verzögert und energetisch abgeschwächt (Vorländer und Witew, 2009). Die Nachhallzeit ist als diejenige Zeit definiert, bei der der mittlere Schalldruckpegel im stationären, eingeschwungenen Raumzustand nach dem Abschalten der Quelle um 60 dB gesunken ist (Fasold und Veres, 2003). Sie wird durch das Raumvolumen und die Absorptionseigenschaften beeinflusst. Je nach Nutzungsart des Raumes finden sich in der Literatur verschiedene, anzustrebende Wertebereiche wieder. Da es nach Ahnert und Tennhardt (2008) schwer ist eine Dynamik von 60 dB zu realisieren, wird in dieser Arbeit der Schallpegelabfall im Bereich von -5 dB bis -25 dB bestimmt. Der bestimmte Wert wird als  $T_{20}$  bezeichnet.

Rechnerisch lässt sich die Nachhallzeit mittels der Steigung des Verlaufes der Abklingkurve bestimmen. Nach DIN EN ISO 3382 (2009, S.20) muss der Verlauf der Abklingkurve, Gleichung 2.1, zunächst durch die Rückwärts-Integration der quadrierten Impulsantwort erzeugt werden.

$$E(t) = \int_{t}^{8} p^{2}(\tau) d\tau = \int_{0}^{8} p^{2}(\tau) d(\tau) - \int_{0}^{t} p^{2}(\tau) d(\tau)$$
(2.1)

Die obere Integralgrenze 8 s wird so gewählt, dass diese einem Zeitpunkt entspricht, an dem die Abklingkurve des Schalldruckpegels um mindestens 30 dB gefallen ist.

Je nach Raumnutzungsart und Raumvolumen ergibt sich mit den Anforderungen der DIN 18041 (2016) ein zufriedenstellender Wertebereich für die Nachhallzeit. Für die Schulaula des Heinz-Berggruen Gymnasiums ergibt sich ein Einzahlwert von  $T_{Soll} = 1,53$  s für das Raumvolumen von V = 1746 m<sup>3</sup>.

Besitzt der Raum eine zu lange Nachhallzeit, so verbinden sich die Klänge der Musik. Im Gegensatz dazu bewirkt eine zu kurze Nachhallzeit einen trockenen Raumeindruck. Fehlende Reflexionen bei einer zu kurzen Nachhallzeit, können dazu führen, dass in Teilen des Raumes kein angemessener Lautstärkepegel herrscht (Fasold und Veres, 2003).

Da der Anfang der Abklingkurve besser von Zuhörern wahrgenommen wird und somit besser mit dem empfundenen Nachhall korreliert, wird die sogenannte Anfangsnachhallzeit *EDT* zusätzlich zur Nachhallzeit verwendet. Sie berücksichtigt eine Absenkung von 0 dB bis - 10 dB und ist im Gegensatz zur Nachhallzeit laut Werner (2009) mehr platzbezogen als raumbezogen.

#### 2. Theoretische Grundlagen

#### 2.1.2. Bassverhältnis

Um die Klangfarbe zu beschreiben, wird der Frequenzgang der Nachhallzeit untersucht. Nach Schröder und Vorländer (2011) ist die Klangfarbe ein Maß für den Einfluss des Raumes auf das Frequenzverhältnis zwischen hohen, mittleren und tiefen Frequenzen. Somit beschreibt sie die "Wärme" eines Musikstückes.

Rechnerisch ergibt sich das Bassverhältnis nach Ahnert und Tennhardt (2008, S.191) aus Gleichung 2.2.

$$BR = \frac{T_{125Hz} + T_{250Hz}}{T_{500Hz} + T_{1000Hz}}$$
(2.2)

Hierbei geben die Indizes die Oktavmittenfrequenz der Nachhallzeit an. In Räumen mit musikalischer Nutzung hat sich ein Bassverhältnis zwischen 1,0 und 1,3 als zufriedenstellend erwiesen (Ahnert und Tennhardt, 2008).

#### 2.1.3. Klarheitsmaß

Das Klarheitsmaß wird in der Raumakustik verwendet, um die Durchsichtigkeit von Musikdarbietungen zu bewerten. Hierfür wird die Schallenergie, die bis 80 ms an einem Zuhörerplatz eintrifft, ins Verhältnis mit der darauffolgenden Schallenergie gesetzt (Ahnert und Tennhardt, 2008). Nach DIN EN ISO 3382 (2009, S.19) erhält man mit Gleichung 2.3 rechnerisch aus der Impulsantwort des Raumes einen Wert für das Klarheitsmaß.

$$C_{80} = 10 \cdot \log \frac{\int_{0}^{0,080} p^2(t) dt}{\int_{0,080}^{8} p^2(t) dt} dB$$
(2.3)

Je höher der Wert für das Klarheitsmaß, desto dominanter wirkt der frühzeitige Schall auf den Zuhörer und bewirkt einen hohen Eindruck der Klarheit. Somit werden zum Beispiel schnelle Musikstücke klar und präzise gehört (Vorländer und Witew, 2009). Um eine Dominanz des frühzeitigen Schalls an einem Zuhörerplatz zu ermöglichen, müssen die Anfangsreflexionen durch die Raumgestaltung gestärkt werden. Optimalwerte für das Klarheitsmaß sind abhängig von der Musikart, wobei Ahnert und Tennhardt (2008) einen zufriedenstellenden Kompromissbereich von -3 dB bis 4 dB benennen.

#### 2.1. Raumakustische Parameter

#### 2.1.4. Schwerpunktzeit

Ein weiterer raumakustischer Parameter, der ebenfalls das Verhältnis von früher und später Energie an einem Zuhörerplatz berücksichtigt, ist die Schwerpunktzeit. Die Schwerpunktzeit wird zum Beschreiben des empfundenen Gleichgewichts zwischen Klarheit und Nachhall benutzt (DIN EN ISO 3382, 2009). Nach Werner (2009) kennzeichnet sie den Zeitpunkt der maximalen Schalleinwirkung. Berechnet wird die Schwerpunktzeit mit Gleichung 2.4 (DIN EN ISO 3382, 2009, S.20).

$$T_{s} = \frac{\int_{0}^{8} t \cdot p^{2}(t) dt}{\int_{0}^{8} p^{2}(t) dt}$$
(2.4)

Für Räume mit musikalischen Darbietungen etablierten sich nach Ahnert und Tennhardt (2008) Werte der Schwerpunktzeit im Bereich von 70 bis 150 ms für 1000 Hz-Oktave als vorteilhaft. Niedrige Werte der Schwerpunktzeit begünstigen einen klaren Schall, wohingegen höhere Werte den großen Einfluss der späten Schallenergie charakterisieren.

#### 2.1.5. Seitenschallgrad

Einfluss auf die Empfindung der Räumlichkeit haben auch Schallreflexionen, die seitlich auf den Zuhörer einfallen. Diese Reflexionen bewirken bei musikalischen Darbietungen das Gefühl einer Ausdehnung der Schallquelle und verhelfen zu einem räumlichen Eindruck (Fasold und Veres, 2003).

Der Seitenschallgrad Lateral Fraction *LF* nach Gade (2007) ist definiert, als das Verhältnis des seitlich einfallenden Energie-Anteils in der Zeit von 5 ms bis 80 ms nach Ankunft des Direktschalls zur allseitig eintreffenden Energie. Zur Berechnung des Seitenschallgrades aus der Raumimpulsantwort gilt nach DIN EN ISO 3382 (2009) Gleichung 2.5.

$$LF = \frac{\int_{0,005}^{0,08} p_L^2(t) dt}{\int_{0}^{0,08} p^2(t) dt}$$
(2.5)

In Gleichung 2.5 ist  $p_L^2(t)$  die seitlich einfallende Energie, welche messtechnisch mittels eines Mikrofons mit einer achtförmigen Richtcharakteristik aufgenommen wird.

#### 2. Theoretische Grundlagen

Zufriedenstellende Werte für den Seitenschallgrad liegen laut Ahnert und Tennhardt (2008) im Bereich von 0,1 bis 0,25.

#### 2.1.6. Stärkemaß

Für eine gute raumakustische Gesamtqualität muss eine ausreichende und gleichmäßig verteilte Lautstärke gegeben sein. Den Einfluss des Schallpegels einer Schallquelle an einem Zuhörerort spiegelt das Stärkemaß wieder. Das Stärkemaß drückt nach DIN EN ISO 3382 (2009) den Zusammenhang zwischen der Schalleinwirkung einer kugelförmig abstrahlenden Quelle an einem Publikumsplatz zu der Schalleinwirkung, die mit derselben Quelle im Freifeld in 10 m Entfernung gemessen wird. Das Stärkemaß G wird anhand von Gleichung 2.6 errechnet.

$$G = 10 \cdot \log \frac{\int_{0}^{6} p^{2}(t) dt}{\int_{0}^{8} p^{2}(t) dt} = L_{pE} - L_{pE,10} dB$$
(2.6)

Die DIN EN ISO 3382 (2009) ermöglicht es mit Gleichung 2.7 den Schalldruck-Wirkpegel  $L_{pE,10}$  aus der Messung des Schalldruck-Wirkpegels in einer Entfernung von 3 m zur Schallquelle zu bestimmen.

$$L_{pE,10} = L_{pE,d} + 20 \cdot \log\left(\frac{d}{10}\right)$$
(2.7)

Ahnert und Tennhardt (2008) empfehlen Werte im Bereich von 4 bis 5,5 dB für das Stärkemaß. Die Lautstärke muss über den gesamten Zuhörerraum einheitlich verteilt sein, um eine gute raumakustische Gesamtqualität zu erreichen (Ahnert und Tennhardt, 2008).

#### 2.2. Raumsimulation

Zur Beurteilung der akustischen Qualität eines Raumes in der Planung kann eine Computersimulation verwendet werden. Hierfür wird zunächst ein 3D - Modell erstellt. In diesem werden die akustischen Eigenschaften durch die Geometrie des Raumes und der Beschaffenheit der Materialien abgebildet. Um auf Basis der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Parameter eine Beurteilung durchzuführen, wird mit verschiedenen Methoden der geometrischen Akustik die Raumimpulsantwort simuliert. Wie Chéenne (2008) beschreibt, basiert die geometrische

#### 2.2. Raumsimulation

Akustik auf der Annahme, dass die Ausbreitung der Schallwellen durch Strahlen beschrieben werden kann. Voraussetzung für diese Annahme ist, dass die betrachtete Wellenlänge klein im Vergleich zu den im Raum vorzufindenden Flächen ist. Durch die Verwendung der geometrischen Akustik werden Wellenphänomene, insbesondere die Beugung, vernachlässigt (Vorländer, 2008). Die Effekte der Beugung treten unter anderem durch Hindernisse im Raum oder durch Kanten an Raumbegrenzungsflächen auf.

Für die raumakustische Optimierung der Schulaula des Heinz-Berggruen Gynmasiums wird in dieser Bachelorarbeit die Simulationssoftware RAVEN<sup>1</sup>verwendet. RAVEN wurde an der RWTH Aachen am Institut für Technische Akustik entwickelt (Schröder und Vorländer, 2011). Laut Schröder und Vorländer (2011) verwendet RAVEN ein hybrides Verfahren um die Raumimpulsantwort eines Raumes zu bestimmen. Das hybride Verfahren ist eine Kombination aus der deterministischen Spiegelschallquellenmethode und dem stoachstischen Ray Tracing.

#### 2.2.1. Deterministische Spiegelschallquellenmethode

Die Spiegelschallquellenmethode basiert auf der Erstellung von virtuellen Schallquellenpositionen durch Spiegelung der Quelle an der auftreffenden Oberfläche (Chéenne, 2008). Die Konstruktion der virtuellen Schallquellen wird bis zur gewünschten Reflexionsordnung *i* durchgeführt, dabei können auch virtuelle Quellen nochmals gespiegelt werden. Eine Spiegelung zweiter Ordnung ist in Abbildung 2.2 anschaulich dargestellt.



Abbildung 2.2.: Spiegelung höher Ordnung durch Reflexion einer virtuellen Schallquelle (Chéenne, 2008, S.221).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Room Acoustics for Virtuell Environments

Bei der Strahlenmethode ist es von Bedeutung, ob die Spiegelschallquellen für den Empfänger relevant sind. Liegt die Reflexion nicht in der Richtung zum Empfänger, so wird die entsprechende Quelle nicht berücksichtigt. Vorländer (2008, S.202) bezeichnet diese Prüfung jeder einzeln erzeugten Schallquelle mit dem Begriff "audibility test".

Die als Ergebnis erhaltene Impulsantwort für einen punktförmigen Empfänger beinhaltet Energieverluste durch Luft- und Materialabsorption, wobei letztere durch die Absorptionsgrade der Materialien gekennzeichnet ist. Der Wert des Streugrades einer Oberfläche wird bei dieser Methode nicht berücksichtigt (Vorländer, 2008).

Zum anderen wird der Rechenaufwand bei komplizierteren Raumgeometrien mit einer höheren Anzahl an Raumflächen sehr groß, da nach Rindel (1997, S.82) die Anzahl möglicher Spiegelschallquellen proportional zu  $(n - 1)^i$ , wobei *n* die Anzahl der Flächen im Raum wiedergibt und *i* die bereits oben erwähnte Ordnung der Reflexion ist. Daraus resultiert gemäß Vorländer (2008, S.204) die Anwendung der Spiegelquellenmethode in den heutigen Simulationsprogrammen für einfache, rechteckige Räume oder zur Bestimmung von Reflexionen kleinerer Ordnung.

#### 2.2.2. Stochastisches Ray Tracing

Beim Ray Tracing Verfahren (Strahlenverfolgung) werden nach Rindel (1997) und Chéenne (2008) eine bestimmte Anzahl an Schallteilchen einer Quelle in verschiedene Richtungen abgestrahlt. Jedes Teilchen besitzt nach der Abstrahlung eine bestimmte Energie, die von der Richtcharakteristik der Schallquelle abhängt (Vorländer, 2008, S.182). Trifft ein Schallteilchen auf eine Raumoberfläche, so wird dieses reflektiert und verliert unter Berücksichtigung des Absorptionsgrades des Materials Energie. Hierbei wird auch der Streugrad des Materials miteinbezogen.

Der Weg jedes einzelnen Partikels wird verfolgt, bis er auf einen Empfänger trifft oder einen bestimmten Energiewert unterschreitet. Als Empfänger der Teilchen dient nach Vorländer (2008) ein kugelförmiger Detektor. Dieser speichert Energie, Ankunftszeit und Einfallsrichtung der auftreffenden Schallteilchen. Am Ende wird gemäß Vorländer (2008) ein Reflektogramm ausgegeben, welches die Impulsantwort darstellt.

#### 2.2. Raumsimulation

#### 2.2.3. Hybride Verfahren

Das in RAVEN verwendete hybride Verfahren kombiniert die in Abschnitt 2.2.1 und 2.2.2 vorgestellten Verfahren zur Berechnung der Raumimpulsantwort. Es ermöglicht die Berechnung einer hochaufgelösten und langen Raumimpulsantwort. Bei diesem Verfahren werden mittels dem Ray Tracining gültige Schallteilchenwege zwischen Sender und Empfänger bestimmt. Anhand der registrierten Wege lassen sich auftreffende Oberflächen bestimmen, welche zur Berechnung der notwendigen Spiegelschallquellen benutzt werden, wiederum unter Berücksichtigung der Energieverringerung durch den Absorptionsgrad der Oberflächen (Vorländer, 1989). Somit fällt eine Bestimmung aller Spiegelschallquellen aus.

Die Bestimmung der Spiegelschallquellen wird zur Aufnahme der frühen Reflexionen kleiner Ordnung verwendet, um hier eine genaue zeitliche Auflösung der Impulsantwort zu bekommen. Zur Bestimmung des diffusen Anteils des Schallfeldes genügt die Verwendung des Ray Tracing Verfahrens. Dabei werden spätere Reflexionen und Streuungen berücksichtigt, die sich durch den Streugrad des Materials charakterisieren.

#### 2.2.4. Absorptions - und Streugrad

Die Berechnung der Raumimpulsantwort mit Hilfe der Computersimulation berücksichtigt die Energieabnahme der Schallteilchen durch Materialkontakt über die Angabe der Absorptionsgrade der Oberflächen. Neben den Absorptionsgraden der einzelnen Oberflächenmaterialien benötigt die Simulation auch deren Streugrade. Durch Unebenheiten und Unregelmäßigkeiten auf Oberflächen wird die Schallreflexion beeinflusst. Welcher Energieanteil der einfallenden Wellenfront in welcher Form zurückgeworfen wird, entscheidet der Absorption- und Streugrade sind in der Literatur kaum zu finden, sodass in Anlehnung an Ackermann und Ilse (2015) in dieser Arbeit ein Model zur Berechnung der Streugrade verwendet wird.

$$h = \sqrt{\frac{-\ln\left(1 - s\left(f\right)\right)c^{2}}{8 \pi^{2} f^{2}}} \Big|_{f=707}$$

$$(2.8)$$

$$s(f) = 1 - e \overline{c^2} \tag{2.9}$$

#### 2. Theoretische Grundlagen

Hierzu wird je nach Oberflächenbeschaffenheit und Strukturtiefe des Materials ein Streugrad für die Frequenz von f = 707 Hz übergeben. Mit Hilfe von Gleichung 2.8 wird die mittlere Höhe h eines Materials berechnet um mit Gleichung 2.9 den frequenzabhängigen Streugrad zu bestimmen, dessen Wertebereich sich von 0,01 bis 0,9 begrenzt (Ackermann und Ilse, 2015).

### 3. Raumakustische Messung

Zur Beurteilung der Raumakustik der momentanen Raumakustik der Schulaula wurde nach DIN EN ISO 3382 (2009) eine Messung durchgeführt. Unter Verwendung der gewonnenen Messergebnisse werden die in Abschnitt 2.1 benannten Parameter als physikalische Größen berechnet. Aufgrund der Tatsache, dass diese Parameter mit subjektiven Wirkungen der Raumwahrnehmung korrelieren, können diese zur Beurteilung der Räumlichkeiten verwendet werden.

#### 3.1. Durchführung der Messung

Die Ermittlung der Raumimpulsantworten der Schulaula erfolgte im unbesetzten Zustand mit einer Bestuhlung von 240 Stühlen. Die Messung wurde mit dem Messskript der Matlab Toolbox AKtools<sup>1</sup>, welches vom Fachgebiet Audiokommunikation der TU Berlin zu Verfügung gestellt wurde, durchgeführt. Als Messsignal diente ein Sweep der Länge 1,5 s mit einer Mittelung über vier Messdurchgänge an einem Messort.

Der erzeugte Sweep wurde durch einen Dodekaeder in den Raum gesendet und die Raumimpulsantwort durch Verwendung eines Kondensatormikrofons mit der Richtcharakteristik einer Kugel aufgezeichnet.

Um den in Abschnitt 2.1.5 beschriebenen Seitenschallgrad zu ermitteln, wird zusätzlich die Raumimpulsantwort benötigt, die mit einem Achter-Richtcharakteristik Mikrofon gemessen wurde. Dafür diente das MKV Soundfield Mikrofon. Dieses ermöglicht durch seine vier Mikrofonkapseln eine getrennte Aufnahme von vier Anteilen, den sogenannten B-Formaten. Der relevante Anteil ist der Gradientenanteil in Y-Richtung, welcher den eintreffenden Schallanteil aus seitlichen Richtungen aufnimmt (Weinzierl, 2008). Zusätzlich zum Schallanteil aus seitlichen Richtungen, wurde auch der W-Anteil des MKV Mikrofons, der die Kugel als Richtcharakteristik widerspiegelt, zur Berechnung des Seitenschallgrades aus Abschnitt 2.1.5 verwendet, um eine identische Empfindlichkeit der beiden Anteile aufzuweisen.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>AKtools - an open software toolbox for signal acquisition, processing, and inspection in acoustics (v1.0).

Daneben wurde zur Bestimmung des Stärkemaßes *G* aus Abschnitt 2.6 die Impulsantwort in einer Entfernung von d = 3 m von der Schallquelle aufgenommen. Dies ermöglicht unter Zuhilfenahme der Gleichung 2.7 aus Abschnitt 2.1.6 den Schalldruck-Wirkpegel  $L_{pE,10}$  zu bestimmen.

Folgende Hardware wurde in dem in Abbildung 3.2 dargestellten Messaufbau für die raumakustische Messung verwendet:

- Apple Mac Book Pro mit Matlab Software
- Verstärker Monoblock MB1140 von K+H Telewatt
- Dodekaeder DO12-5 von Schalltechnik SÜD & NORD
- Audio Interface Focusrite Scarlett 18i20
- Kondensatormikrofon 1/2"Difussfeldkapsel von Brüel & Kjaer
- MKV Soundfield Control Unit
- MKV Soundfield Mikrofon



Abbildung 3.1.: Messaufbau der raumakustischen Messung.

Die Messung fand mit zwei unterschiedlichen Senderpositionen (S1, S2) und neun Empfangspositionen (E1-E9) statt. Alle Messpositionen sind schematisch im Grundriss der Schulaula in Abbildung 3.2 zu sehen. Die zwei Senderpositionen ergaben sich nach der Forderung der DIN EN ISO 3382 (2009), sodass sie mit dem Ort der Musiker übereinstimmen. Die Musiker finden in dieser Schulaula vor der Bühne Platz. Die Schallquelle wurde 1,5 m über dem

#### 3.1. Durchführung der Messung

Boden platziert. Die neun Empfangspositionen waren mindestens 2 m voneinander entfernt und über den Zuhörerbereich verteilt. Jede Mikrofonposition hatte mindesten einen Abstand von 1 m zur nächstgelegenen reflektierenden Oberfläche. Die Empfangsposition wurden auf eine Höhe von 1,2 m eingestellt, da dies gemäß DIN EN ISO 3382 (2009) "[...] der Ohrhöhe des durchschnittlichen Zuhörer im üblichen Sitzen [...] beträgt".



Abbildung 3.2.: Grundriss der Schulaula. Der Sitzbereich ist in drei Abschnitte unterteilt: links, mittig und rechts. In Jedem Sitzbereich wurden drei Empfangspositionen für die Messung benutzt. Die beiden Senderpositionen befinden sich vor der Bühne, im Orchesterraum.

#### 3. Raumakustische Messung

#### 3.2. Auswertung der Messung

Auf Grundlage der in Abschnitt 2.1 genannten Gleichungen für die ausgewählten raumakustischen Parameter wurden die aus der Messung gewonnen Daten ausgewertet. Hierfür wurde die ITA-Toolbox<sup>2</sup> in Matlab verwendet um die in Abschnitt 2.1 genannten raumakustischen Parameter zu bestimmen. Zum Aufrufen der ITA-Toolbox Funktionen und weiteren Verarbeitungen der Ergebnisse, wird das MATLAB-Skript *Auswertung.m* verwendet. Ausgewertet wurde im Frequenzbereich von 250 Hz bis 4000 Hz in Oktavbändern.

Es wurden insgesamt 18 Impulsantworten bei der raumakustischen Messung aufgenommen. Alle Raumimpulsantworten für die Senderposition 1 sind im Anhang A.1 zu finden. In Abbildung 3.3 ist das Energiereflektorgramm der gemessenen Raumimpulsanwort am Empfangsort eins mit der Senderposition eins abgebildet.

In dem Energiereflektogramm in Abbildung 3.3 trifft bei ca. 38,5 ms der Direktschall auf die Zuhörer, darauf folgend sind die für die Zuhörer wichtigen frühzeitigen Reflexionen zu sehen. Insbesondere die erste Reflexion mit einer hohen Amplitude bei ca. 50,5 ms fällt stark auf.

Wird die Abbildung 3.3 mit dem Energiereflektogramm an Empfangsposition drei in Abbildung 3.4 verglichen, so ist die erste Reflexionen bei ca. 63 ms nachdem, der Direktschall bei ca. 55 ms eintrifft.

Der Nachhallbereich der Schulaula, welches ein Raumvolumen von  $V \approx 1746 \text{ m}^3$  aufweist, beginnt nach Fasold und Veres (2003, S.149) bei etwa  $t_{gr} = \sqrt{V} \approx 83 \text{ ms}$ . Ab diesem Zeitpunkt sollte die Raumimpulsantwort gleichmäßig abfallen, jedoch fällt in Abbildung 3.5 eine herausragende Reflexion bei ca. 125 ms auf, die eine stärkere Intensität aufweist als Vorherige. Die Unregelmäßigkeit in diesem Bereich der Raumimpulsantwort könnte auf eine störende Reflexion hindeuten. Während der Messung waren solche störende Reflexionen wahrnehmbar. Die misslungene Schalllenkung lässt sich aufgrund der konkav geformten Decke erklären. Diese Form lässt Fokussierungseffekte entstehen, welche im Zuhörerbereich für erhebliche Störungen sorgen. Es entsteht eine ungleichmäßige Schallversorgung und nach Fasold und Veres (2003) somit ein unausgewogenes Schallfeld. Um welche Art der Fokussierung es sich handelt, ist abhängig vom Radius der konkav geformte Decke einen Radius von 4,8 m. Anhand dieser beiden Maßen lässt sich anhand Abbildung 3.6 sagen, dass der Brennpunkt der Fokussierung im Zuschauerbereich liegt, da  $r \approx h$  gilt.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>ITA-Toolbox - An Open Source MATLAB Toolbox for Acousticians

#### 3.2. Auswertung der Messung



Abbildung 3.3.: Gemessenes Energiereflektogram bis zur 400 ms an Empfängerposition eins mit der Senderposition eins.



Abbildung 3.4.: Gemessenes Energiereflektogram bis zur 400 ms an Empfängerposition drei mit der Senderposition eins.

3. Raumakustische Messung



Abbildung 3.5.: Ausschnitt der Raumimpulsantwort an Empfängerposition zwei mit Senderposition eins.



Abbildung 3.6.: Fokussierungseffekte bei konkaven Decken. Abbildung aus Gade (2007).

#### 3.2. Auswertung der Messung

Die Bestimmung der Nachhallzeit der Schulaula fand durch die arithmetische Mittelung über jede Messposition statt. Hiermit wird der räumliche Mittelwert über den gesamten Raum erzielt. Die Abbildung 3.7 zeigt das Ergebnis der Nachhallzeit  $T_{20}$  in Sekunden über dem Oktavband von 250 Hz bis 4000 Hz. Die Werte für die Nachhallzeit liegen im Bereich von 0,7 s bis 1,5 s. Zusätzlich ist der Toleranzbereich der Anforderung an die Nachhallzeit für die Schulaula als Nutzungsart A1 (Musik) mit dem Raumvolumen V = 1746 m<sup>3</sup> nach der DIN 18041 (2016) angegeben. Für diese Nutzungsart ist ein Anstieg der Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen empfohlen. Da die Anforderung der Nachhallzeit sich auf den besetzten Zustand (80 % der Regelbesetzung) berufen, wurde die Oktav aufgelöste Nachhallzeit aus der Messung mithilfe der DIN 18041 (2016, S.23 f) rechnerisch angepasst, in dem die Schallabsorptionswerte aus Tabelle 3.1 mit einer Besetzung von 240 Personen berücksichtigt wurde. Die Umrechnung wird unter Verwendung der selbstgeschriebenen MATLAB-Funktion *getT\_Besetzt.m* durchgeführt.

Als Einzahlwert für die Nachhallzeit  $T_{20}$  für den besetzten Zustand ergibt sich ein Wert von 1,28 s durch Mittlung der mittleren (500 Hz und 1 kHz) Frequenzen. Vergleichend zum genanten Sollwert  $T_{Soll}$  von 1,52 s aus Abschnitt 2.1.1 für die Schulaula, ist der ermittelte Wert zu niedrig. Die ausgewertete Nachhallzeit in Abbildung 3.7 zeigt, dass die Nachhallzeit der Schulaula für den tiefen und hohen Frequenzbereich außerhalb des empfohlenen Toleranzbereich liegt. Von 200 Hz bis 1000 Hz bestitzt der Raum eine zufriedenstellende Nachhallzeit. Für die Schulaula ergibt sich eine Volumenkennzahl  $k = 7 \frac{m^3}{Platz}$  für den besetzten Zustand von 80 %. Dieser Wert liegt nach DIN 18041 (2016) noch in der Raumgruppe für Musikdarbietungen, welche Werte im Bereich von 7 bis 8  $\frac{m^3}{Platz}$  anstreben sollten.

Beschreibung	Frequenz [Hz]						
Deschieldung		250	500	1000	2000	4000	
Person sitzend auf ungepolsterter Bestuhlung, je Person in m <sup>2</sup>	0,15	0,3	0,4	0,45	0,55	0,55	

Tabelle 3.1.: Zusätzliche Schallabsorptionsfläche (DIN 18041, 2016, S.24).

#### 3. Raumakustische Messung



Abbildung 3.7.: Gemessen Nachhallzeit  $T_{20}$  in s der Schulaula.

Tabelle 3.2.: Werte der gemessene	Nachhallzeit $T_{20}$	im unbesetzten	und besetzten	Zustand
der Schulaula.				

Frequenz [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Nachhallzeit $T_{20}$ unbesetzter Zustand [s]	1,26	1,60	1,48	1,30	1,08	0,80
Nachhallzeit $T_{20}$ besetzter Zustand (nur Publikum) [s]	1,22	1,50	1,37	1,20	1,00	0,75

Zusätzlich zur Nachhallzeit ist in Tabelle 3.3 die platzbezogene Anfangsnachhalllzeit  $EDT_m$ zu sehen. Diese ist als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009) je Empfangsort für die Senderposition eins angegeben. Werden die Werte für die Anfangsnachhallzeit mit dem Einzahlwert der Nachhallzeit  $T_{20} = 1,39$  s im unbesetzten Zustand verglichen, haben einige Sitzplätze eine geringere Anfangsnachhallzeit. Die Anfangsnachhallzeit sollte für jeden Empfangsplatz annähernd gleich sein und mit der herkömmlichen Nachhallzeit übereinstimmen oder größer sein.

Ein weiterer Parameter, das Bassverhältnis, welches aus dem Frequenzgang der Nachhallzeit bestimmt wurde und mit der Klangfarbe des Nachhalls zusammenhängt, erreicht für die Schulaula einen Wert von BR = 1,06. Dieser Wert wurde nach Gleichung 2.2 mit der örtlich gemittelten Nachhallzeit  $T_{20}$  im besetzten Zustand bestimmt und liegt geringfügig unterhalb des zufriedenstellenden Wertebereiches für musikalische Räume.

Tabelle 3.3.: Anfangsnachhallzeit  $EDT_m$  in s als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009). Dargestellt für jede Empfangspostion mit Senderposition eins.

Empfänger	$EDT_m$ [s]	Empfänger	$EDT_m$ [s]	Empfänger	$EDT_m$ [s]
E7	1,15	E1	1,43	E4	1,39
E8	1,19	E2	1,61	E5	1,44
E9	1,31	E3	1,67	E6	1,27

Tabelle 3.4.: Bassverhältnis *BR*. Dargestellt für jede Empfangspostion mit der Senderposition eins.

Empfänger	BR	Empfänger	BR	Empfänger	BR
E7	1,05	E1	0,96	E4	1,03
E8	1,01	E2	1,03	E5	0,99
E9	1,02	E3	0,99	E6	1,03

In Tabelle 3.4 sind die Ergebnisse des Bassverhältnises für jede Empfangsposition zu sehen. Das Bassverhältnis ist nahezu an jeder Position gleich.

In Tabelle 3.5 sind die Werte für das Klarheitsmaß  $C_{80m}$  und die Schwerpunktzeit  $T_{sm}$  zu sehen. Diese beiden Parameter korrelieren entsprechend der DIN EN ISO 3382 (2009) mit der wahrgenommenen Transparenz an einem Zuhörerort und wurden nach Gleichung 2.3 bzw. 2.4 bestimmt. Das Klarheitsmaß erreicht Werte im Bereich von - 0,9 dB bis 3,2 dB und die Schwerpunktzeit im Bereich von 78 ms bis 116 ms.

In Tabelle 3.5 verdeutlichen die Werte für das Klarheitsmaß  $C_{80m}$ , dass die hinteren Zuhörerplätze mit weniger frühzeitigen Schall versorgt werden, als die vorderen. Ebenso ist eine starke Unregelmäßigkeit entlang der Sitzreihen zu sehen. Die äußeren Sitzabschnitte weisen höhere Werte auf als der mittlere, somit dominiert der frühzeitige Schall der Quelle in den äußeren Bereichen.

Die Ergebnisse der Schwerpuntkzeit  $T_{sm}$  in Tabelle 3.5 erreichen Werte von 78 bis 116 ms für die erste Senderposition. Je weiter hinten Zuhörer Platz nehmen, desto höher ist der Einfluss der späteren Schallenergie. In Analogie zum Ergebnis des Klarheitsmaßes, werden die äußeren Sitzbereiche mit einem höheren Anteil an frühzeitigeren Schallanteilen unterstützt.

#### 3. Raumakustische Messung

Tabelle 3.5.: Deutlichkeitsmaß	$C_{80m}$	in	dB	und	Schwerpunktzeit	$T_{sm}$	in	ms	als
Einzelfrequenz-Mi	ttelwer	t na	ch Dl	IN EN	ISO 3382 (2009).	Darge	stellt	für	jede
Empfangspostion n	nit der	Sen	derpo	osition	eins.				

Empfänger	$C_{80m}$ [dB]	$T_{sm}$ [ms]	Empfänger	$C_{80m}$ [dB]	T <sub>sm</sub> [ms]	Empfänger	$C_{80m}$ [dB]	T <sub>sm</sub> [ms]
E7	3,2	85	E1	0,0	103	E4	2,4	78
E8	2,2	91	E2	-0,9	116	E5	0,6	98
E9	1,6	95	E3	0,7	113	E6	0,8	95

Zur Beschreibung des Raumeindruckes eines Zuhörers an seinem Sitzplatz wurde der Seitenschallgrad bestimmt, der die seitlich einfallende Schallenergie berücksichtigt. Das Ergebnis der Auswertung ist in Tabelle 3.6 zu sehen. Zwei Messpunkte (E8, E9) besitzen einen Wert innerhalb des nach Ahnert und Tennhardt (2008) als günstig geltenden Wertebereich von 0,1 bis 0,25 für den Seitenschallgrad  $LF_m$ . Alle anderen Messwerte liegen oberhalb dieser Werte.

Tabelle 3.6.: Seitenschallgrad  $LF_m$  als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009). Dargestellt für jede Empfangspostion mit der Senderposition eins.

Empfänger	$LF_m$	Empfänger	$LF_m$	Empfänger	$LF_m$
E7	0,299	E1	0,401	E4	0,284
E8	0,243	E2	0,307	E5	0,317
E9	0,212	E3	0,360	E6	0,391

Zur Bewertung der wahrgenommenen Lautstärke an einem Publikumsplatz wurde das Stärkemaß bestimmt. Das Ergebnis der Auswertung ist in Tabelle 3.7 dargestellt. Für jeden Sitzabschnitt der Schulaula wird der subjektive Schallpegel niedriger je weiter ein Sitzplatz vom Orchesterraum entfernt ist. Keiner der gemessen Plätze erreicht den nach Beranek (2004) definierten Wertebreich von 4 bis 4,5 dB für Konzertsäle, die als ,exzellent' eingestuft werden.
(									
Empfänger	$G_m$ [dB]	Empfänger	$G_m$ [dB]	Empfänger	$G_m$ [dB]				
E7	0,0	E1	2,1	E4	0,9				
E8	-0,7	E2	0,1	E5	-0,9				
E9	-1,5	E3	-1,0	E6	-1,6				

Tabelle 3.7.: Stärkemaß  $G_m$  in dB als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009). Dargestellt für jede Empfangspostion mit der Senderposition eins.

## 3.3. Beurteilung der Raumakustik

Zur Beurteilung der Raumakustik in der Schulaula des Heinz-Berggruen Gymnasiums dienen, die in Abschnitt 3.2 berechneten Ergebnisse der Parameter.

Die Ergebnisse der Messung verdeutlichen, dass die Verteilung der frühzeitigen Reflexionen in der Schulaula ungleichmäßig ist. Es wurde festgestellt, je entfernter ein Zuhörer vom Orchester Platz nimmt, desto weniger frühzeitige Reflexionen erfährt jener. Diese Unregelmäßigkeit findet sich auch in den Publikumsabschnitten wieder. Der mittlere Sitzabschnitt wird mit weniger frühen Reflexionen unterstützt, als die äußeren Sitzabschnitte. Für eine hohe Durchsichtigkeit von Musikdarbietungen im Raum sollte auch jede erste Schallreflexionen in die seitlichen und hinteren Sitzbereiche gelangen. Durch das Fehlen der frühzeitigen Reflexionen in hinterem Publikumsbereich wird. im Vergleich zum vorderen, eine ausreichende Lautstärke nicht gewährleistet. Eine gleichmäßig und über den Raum verteilte Lautstärke führt zu einer zufriedenstellenden Gesamtakustik.

Des Weiteren wurde im Abschnitt 3.2 festgestellt, dass aufgrund der konkav geformten Decke Schallfokussierungen entstehen, die störend auf den Zuhörer wirken. Diese Fokussierungseffekte entstehen durch Reflexionen an der Deckenoberflächen und sollte unterbunden werden.

Durch eine Umgestaltung des Deckenbereiches können die genannten Problematiken gelöst werden. Denn nicht nur die Fokussierungseffekte treten in Folge der konkav geformten Decke auf, sondern auch der Mangel an frühzeitigen Reflexionen.

Die Auswertung der Nachhallzeit aus Abschnitt 3.2 hat gezeigt, dass die Nachhallzeit für tiefe und hohe Frequenzen zu niedrig ist. Eine Erhöhung der Nachhallzeit durch vergrößern des Raumvolumens oder durch Verringerung der äuivalenten Absorptionsfläche wäre möglich. An dieser Stelle wäre es sinnvoll, den Verlauf der Nachhallzeit zu glätten, damit die

## 3. Raumakustische Messung

Nachhallzeit für jede Frequenz konstant wird. Dies ist insbesondere für die platzbezogene Anfangsnachhallzeit wichtig, um eine Gleichmäßigkeit für die Zuhörenden zu erzielen.

# 4. Raumakustische Simulation mit RAVEN

Zur Optimierung und Lösung, der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Problematik wird eine raumakustische Computersimulation durchgeführt. Hierzu wird die Simulationssoftware RAVEN benutzt. RAVEN verwendet zur Bestimmung der Raumimpulsantwort, die in Abschnitt 2.2 beschriebenen hybride Methode.

Um eine Computersimulation durchführen zu können, wurde die Schulaula mittels der CAD-Software SketchUp modelliert. Hierbei wird das durch RAVEN integrierte Plugin verwendet, um Oberflächen im Raummodell mit Materialien zu belegen, welche akustische Eigenschaften besitzen. Diese akustischen Eigenschaften sind die Absorptions- und Streugrade, die nach Abschnitt 2.2.4 zur Berechnung der Raumimpulsantwort benötigt werden. Des Weiteren können Berechnung von raumakustischen Parametern direkt in SketchUp durchgeführt werden.

Um außerhalb der SketchUp Umgebung mittels RAVEN GUI oder MATLAB eine Simulation durchzuführen, wird das Modell als AC3D-Datei<sup>1</sup> und alle weiteren Simulationsparameter, wie zum Beispiel die Quell- und Empfängerposition, als RPF-Datei<sup>2</sup> exportiert (Böhm, 2015).

Die Positionierungen von Sender und Empfänger werden in Anlehnung an die Messung aus Abschnitt 3 durchgeführt, um die gewonnenen Ergebnisse vergleichen zu können.

In diesem Kapitel werden zunächst alle Einstellungen und Vorbereitungen zur Durchführung der Simulation unter Verwendung von RAVEN erläutert. Im Anschluss wird das Ergebnis der Simulation des Grundmodels der Schulaula vorgeführt.

## 4.1. RAVEN Konfiguration

Für eine raumakustische Optimerung der Schulaula mithilfe einer Computersimulation wird diese als 3D-Modell mit der Software SketchUp nachgebildet. Hierzu wird der vorhandene

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Dateiformat für dreidimensionale Modelle (.ac)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>RAVEN-Project-Datei (.rpf)

Grundriss und weitere Daten aus der Begehung der Schulaula verwendet, um ein Raummodell zu erstellen. Verschiedene Ansichten des Modells sind in Abbildung 4.1 zu sehen. Das Modell verfügt über 28 Flächen und alle für die Simulation relevanten geometrischen Eigenschaften wurden einbezogen. Dabei wurde, die in Abschnitt 2.2 beschriebene Voraussetzung für eine akustische Simulation berücksichtigt, die davon ausgeht, dass Oberflächen, die gegenüber der Wellenlänge klein sind, nicht modelliert werden.





(a) Außenansicht des Modells der Schulaula.

(b) Seitenschnitt des Modells der Schulaula.



(c) Rückseitenschnitt des Modells der Schulaula.

Abbildung 4.1.: Das erstellte Modell der Schulaula des Heinz-Berggruen Gymnasiums unter Verwendung der CAD-Software SketchUp.

Für die Werte der Absorptionsgrade der Oberflächenmaterialien wurden aus der Tabelle der Physikalische-Technische Bundesanstalt (2012) eine erste Vorauswahl getroffen. Unter Verwendung dieser Vorauswahl ermöglicht es RAVEN eine gewünschte Nachhallzeit im Raum, durch eine iterative Anpassung der Absorptionsgrade der einzelnen Materialien einzustellen. Somit wird das Raummodell an die Messung der Nachhallzeit aus Abschnitt 3.2 angepasst. Hierzu wird, wie von Ackermann und Ilse (2015, S. 38f.) beschrieben, durch einen

## 4.1. RAVEN Konfiguration

Simulationsvorgang die aktuelle Nachhallzeit je Frequenzband berechnet. Mittels dieser, der gewünschten Nachhallzeit und des aktuellen Absorptionsgrades, wird ein neuer Absorptionsgrad je Frequenzband bestimmt. Durch Multiplikation des aktuellen Absorptiongrades eines Materials mit einem Faktor, welcher durch Bildung des Verhältnisses von neuem Absorptionsgrad zu aktuellem Absorptiongrad berechnet wird, lässt sich für jedes Material ein neuer Grad ermitteln. Eine erneuter Simulationsvorgang wird zur Ermittlung der Nachhallzeit durchgeführt. Durch Wiederholung dieser Schritte wird die vorgegeben Nachhallzeit erreicht.

Um eine Anpassung der Nachhallzeit der Schulaula durchzuführen, wird das MATLAB-Skript *Schulaula\_materials.m* ausgeführt. Das Resultat dieser Anpassung und die zur Simulation verwendeten Absorptionsgrade sind in Tabelle 4.1 zu finden. Hierbei ergeben sich für einzelne Materialien teilweise höhere Absorptionsgrade im hohen Frequenzbereich im Vergleich zu den literarisch aufgefassten. Dies ist durch die in Abschnitt 2.2 beschriebene Problematik, der Vernachlässigung der Beugungseffekte und nicht detailgetreuen Nachbildung der Streueffekte, der geometrischen Akustik zurückzuführen.

Oberflächen			Streuung					
	[m <sup>2</sup> ]	125	250	500	1000	2000	4000	707 Hz
Gispkarton	375,9	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,12	0,02
Dämmung mit Holzbal- ken	54,2	0,26	0,47	0,78	0,92	0,98	0,96	0,25
Fenster	143,6	0,35	0,24	0,17	0,12	0,07	0,04	0,1
Holzboden Bühne	45,4	0,05	0,03	0,04	0,07	0,09	0,10	0,05
Vorhang	27,5	0,32	0,57	0,69	0,61	0,80	0,90	0,1
Holzboden	160,2	0,07	0,03	0,05	0,08	0,17	0,30	0,08
Treppe	2,5	0,24	0,06	0,04	0,08	0,17	0,26	0,5
Holzbalken	136,2	0,36	0,69	0,26	0,23	0,22	0,29	0,4
Stuhl	120	0,08	0,06	0,07	0,17	0,33	0,51	0,05

Tabelle 4.1.: Werte der Absorptionsgrade von 125 Hz bis 4000 Hz und der Streugrade bei707 Hz der Oberflächenmaterialien des 3D-Modells der Schulaula.

Die zur Simulation benötigten frequenzabhängigen Streugrade wurden mit dem MATLAB-Skript *scattCoeff.m* berechnet. Dieses Skript wurde aus Ackermann und Ilse (2015) übernommen und berechnet auf Basis von Abschnitt 2.2.4 die Streugrade aller im Raummodell beinhaltete Materialien nach Eingabe des Streugrades bei einer Frequenz von f = 707 Hz, welche in Tabelle 4.1 zu finden sind.

Zur Berechnung der Raumimpulsantwort unter Verwendung der Simulationssoftware RA-VEN müssen zu Beginn einige Einstellungen vorgenommen werden. Die verwendeten Einstellungen werden im Anschluss unter Angabe der benötigten MATLAB Syntax erläutert (Ackermann und Ilse, 2015). Alle genannten Eingabewerte sind in der *Schulaula.m*-Datei zu finden, mit welcher die Simulation durchgeführt wurde.

#### Raumparameter

rpf.setTemperature(temp)
rpf.setHumidity(humidity)
rpf.setPressure(pressure)

Diese drei Eingabewerte stellen Raumtemperatur, Luftfeutigkeit und Luftdruck in der Simulation ein. Sie werden zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit und der Luftabsorption benötigt und entsprechen den Werten, die während der raumakustischen Messung herrschten. Für die Raumtemperatur gilt *temp* =  $27^{\circ}C$ , für die Luftfeuchtigkeit *humidity* = 52 % und der Luftdruck ergibt sich zu *pressure* = 101300 Pa.

## Optionen der Spiegelschallquellenmethode

rpf.setSimulationTypeIS(simTypeIS)
rpf.setISOrder\_PS(ISOrder\_PS)
rpf.setISOrder\_SS(ISOrder\_SS)

Der Befehl *setSimulationTypeIS(simTypeIS)* schaltet die in Abschnitt 2.2.1 beschrieben Spiegelschallquellenmethode durch Eingabe des Parameters *simTypeIS* = 1 ein. RAVEN verwendet dieses Verfahren, um frühzeitige Reflexionen des Raummodells zu berechnen. Die Spiegelschallquellenordnung *ISOrder\_PS* wird auf drei gesetzt.

#### 4.1. RAVEN Konfiguration

## **Optionen des Ray Tracing Verfahren**

rpf.setSimulationTypeRT(simTypeRT) rpf.setTimeSlotLength(TimeSlotLength) rpf.setRadiusDetectionSphere(radiusDetection) rpf.setEnergyLoss(energyLoss) rpf.setNumParticles(NumParticles)

Das in Abschnitt 2.2.2 vorgestellte Ray Tracing Verfahren wird mit dem Parameter *sim-TypeRT* eingeschaltet. Die zeitliche Auflösung des erzeugten Histogramms *TimeSlotLength* wird unter Anwendung von *rpf.setTimeSlotLength(TimeSlotLength)* auf 1 ms gesetzt. Der Radius des kugelförmigen Detektors *radiusDetection* zum Empfang der auftreffenden Schallteilchen wird auf 0,5 m gesetzt. Unterschreitet ein Partikel den Energiewert *energyLoss* von 63 dB, so wird seine weitere Verfolgung unterbrochen.

Um eine genügend hohe Rechengenauigkeit zu erreichen, wird die Anzahl der Partikelzahl, welche von der Schallquelle in den Raum gesendet wird, mit dem Parameter *NumParticles* auf 200000 gesetzt.

## Einstellungen der Filter

rpf.setFilterResolution(filterRes) rpf.setAmbisonicsOrder(ambisonicsOrder) rpf.setFilterLengthToReverbTime()

Die Frequenzauflösung in RAVEN kann mit dem Parameter *filterRes* eingestellt werden. Die Simulation der Schulaula wird in Oktavauflösung durchgeführt. Durch die Anwendung der Syntax *rpf.setFilterLengthToReverbTime()* wird die Länge der berechneten Raumimpulsantwort bzw. Binauralenraumimpulsantwort auf den maximalen Wert der Nachhallzeit des Raummodels gesetzt. Die Ausgabe eines B-Format-Signals wird mit dem Parameter *ambisonicsOrder*) in dieser Arbeit ausgeschaltet.

## 4. Raumakustische Simulation mit RAVEN

#### Einstellung der Zufallsprozesse

rpf.setFixPoissonSequence(fixPoisson)
rpf.setPoissonSequenceNumber(seqPoisson)
rpf.setFixReflectionPattern(fixReflection)

RAVEN verwendet im Ray Tracing Verfahren ein Poisson-verteilten Zufallsprozess zur Bestimmung des späten Nachhalls (Ackermann und Ilse, 2015). Um für jede Simulation die gleiche Poissonsequenz zu verwenden, wird der Parameter *fixPoisson* auf den Wert von 1 gesetzt. Durch den Befehl *rpf.setPoissonSequenceNumber(seqPoisson)* wird der Startpunkt dieser Poissonsequenz auf 1 festgelegt. Mit diesen beiden Festsetzungen lassen sich aufeinanderfolgende Simulationen miteinander vergleichen. Nicht nur beim Ray Tracing Verfahren verwendet RAVEN Zufallsprozesse, auch bei Streuungen von Schallstrahlen an Oberflächen. Hierfür wird der Paramaeter *fixReflection* auf 1 gesetzt, um einen gleiche Ablauf bei jedem Simulationsvorgang zu ermöglichen.

## Beschleunigungsalgorithmus

## rpf.setAccelerationType(accelerationType)

Durch die Setzung des Parameters *accelerationType* auf den Wert 0, wird in RAVEN der Beschleunigungsalgorithmus Binary Space Partitioning aktiviert. Dieser Beschleunigungsalgorithmus wird im Ray Tracing Verfahren verwendet um Schnittpunkte von Strahlen mit Oberflächen zu berechnen.

## 4.2. RAVEN Durchführung

Zur Bestimmung der in Abschnitt 2.1 aufgeführten raumakustischen Parameter durch RA-VEN wird das MATLAB-Skript *Schulaula.m* verwendet. Hierzu werden alle aus Abschnitt 3.2 genannten raumakustischen Parameter ermittelt und als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009) pro Messposition dargestellt. Eine Ausnahme bildet die Bestimmung der Nachhallzeit, die als örtliche Mittelung angegeben wird.

Der Ausgangspunkt zur Bestimmung aller raumakustischen Parameter ist das durch RA-VEN erstellte Energiehistogramm. Durch Verwendung unterschiedlicher MATLAB-Befehle

#### 4.3. RAVEN Simulation des Grundmodels

werden die raumakustischen Parameter berechnet. Dabei können durch eine Veränderung der Parameter dieser MATLAB-Befehle die Ausgaben der Ergebnisse konfiguriert werden. Die Konfiguration zur Ermittelung eines raumakustischen Parameters, als Einzelfrequenz-Mittelwert mit der Senderposition eins wird beispielhaft durch Verwendung des Befehls *rpf.getEDT(averageOverReceivers, averageOverFrequencies, afterDin, SourceID)* erklärt. Dieser Befehl dient zur Bestimmung der Anfangsnachhallzeit.

Da die Angabe des Ergebnisses für jede Empfängerposition stattfindet, wird der Parameter *averageOverReceivers* = 0 gesetzt. Die Ausgabe des Parameterwertes als Einzelwert-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009), erfolgt durch *afterDin* = 1. Wird *averageOverFrequencies* auf den Wert 0 gesetzt, so findet keine Mittelwertbildung des ramakustischen Parameters über alle Frequenzen statt. Der Parameter *SourceID* dient zur Auswahl der Schallquelle und beginnt bei 0.

In Analogie zum vorrangigem Beispiel werden alle weiteren Parameter der MATLAB-Befehle zu Ermittelung der raumakustischen Parameter gesetzt. Eine Ausnahme bildet die Bestimmung der Nachhallzeit  $T_{20}$ . Diese wird unter Verwendung des Befehls rpf.getRT(1,0,0,-5,-25,0) für die erste Senderposition mit einer Mittelung über aller Empfängerpositionen frequenzaufgelöst erhalten.

Analog wird die Nachhallzeit als Mittelung aller Empfangspositionen für die zweite Senderposition ermittelt, um im Anschluss aus diesen beiden Ergebnissen die örtliche Nachhallzeit  $T_{20}$ , im besetzten und unbesetzten Zustand, zu bestimmen.

Das Deutlichkeitsmaß  $C_{80m}$  errechnet RAVEN unter Verwendung von rpf.getClarity(0,1,0)und die Schwerpunktzeit  $T_{sm}$  wird aus rpf.getCenterTime(0,1,0) erhalten. Die Berechnung des Seitenschallgrades zur Bestimmung des Einflusses der seitlichen Reflexionen auf den Zuhörer führt RAVEN mit dem Befehl rpf.getClarity(0,1,0) durch. Hierbei berechnet RA-VEN die drei Seitenschallgrade *LE*, *LF* und *LFC*. In dieser Arbeit wird lediglich der Seitenschallgrad *LF* aus Abschnitt 2.1.5 benötigt.

Das in Abschnitt 2.1.6 beschriebe Stärkemaß wird durch RAVEN mit dem Befehl rpf.getStren gth(0,1,1) bestimmt.

## 4.3. RAVEN Simulation des Grundmodels

Bevor die Maßnahmen zur Optimierung in Abschnitt 5 und deren Simulationsergebnisse zur Lösung der in Abschnitt 3.3 aufgeführten Problematik vorgestellt werden, werden die raumakustischen Parameter aus dem Ergebnis der Simulation des Grundmodells der Schulaula aus Abbildung 4.1 vorgestellt. Hierbei sind diese mit den Ergebnissen der Messung aus Abschnitt 3.2 verglichen worden.

Die Werte für die Nachhallzeit  $T_{20}$  im besetzten und unbesetzten Zustand für das Grundmodell sind in Tabelle 4.2 zu sehen. Durch die in Abschnitt 4.1 beschriebene Anpassung des Grundmodells an die Nachhallzeit  $T_{20}$  der Messung, haben die Werte der Nachhallzeit  $T_{20}$ im unbesetzten Zustand eine maximale Abweichung von 12 %.

Tabelle 4.2.: Simulierte Nachhallzeit  $T_{20}$  im unbesetzten und besetzten Zustand der Schulaula des Grundmodells.

Frequenz [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Nachhallzeit $T_{20}$ unbesetzter Zustand [s]	1,23	1,48	1,46	1,29	1,08	0,80
Nachhallzeit $T_{20}$ besetzter Zustand (nur Publikum) [s]	1,23	1,50	1,36	1,20	1,00	0,76

Wird das Ergebnis der Anfangsnachhallzeit  $EDT_m$  aus der Simulation des Grundmodells in Abbildung 4.2 betrachtet und mit den Werten aus der raumakustischen Messung verglichen, liegen geringe Abweichungen vor. Die Werte der Simulation bewegen sich im Bereich von 1,19 s bis 1,29 s und verhalten sich für einen Publikumsbereich konstant. Es ergibt sich eine ähnliche Anfangsnachhallzeit  $EDT_m$  für einen vorderen Sitzplatz und einen Sitzplatz im hinteren Raum.

Die aus Abbildung 4.2 zu sehenden Werte für das Bassverhältnis *BR* der Simulation weichen nur geringfügig von der Messung ab. Hier tritt eine maximale Abweichung von ca. 9 % auf. Da das Bassverhätnis aus der Nachhallzeit bestimmt wird, lässt sich die geringe Abweichung damit erklären, dass die Nachhallzeit der Simulation an die Nachhallzeit der raumakustischen Messung angepasst wurde. Das Bassverhältnis *BR* erreicht Werte von 0,95 bis 1,04 für die raumakustische Simulation mit RAVEN.

Zur Bewertung, ob die Simulation des Grundmodells, ebenfalls die Problematik der Schulaula bezüglich fehlender frühzeitiger Reflexionen im hinteren Saalbereich und eine Unregelmäßigkeit entlang der Sitzabschnitte aufzeigt, dienen die Ergebnisse für das Deutlichkeitsmaß  $C_{80m}$  und die Schwerpunktzeit  $t_{sm}$  aus Abbildung 4.3. Das Deutlichkeitsmaß  $C_{80m}$  aus der Simulation weist größere Werte auf, als im Vergleich zur raumakustischen Messung. Die Veränderung im Saal lässt sich auch aus der Simulation erkennen. Auch hier verringert sich das Deutlichkeitsmaß in jedem Sitzabschnitt für hintere Plätze und verhält sich nicht konstant für jeden Sitzabschnitt (links, mittig und rechts).



Abbildung 4.2.: Unterschied zwischen der simulierten Anfangsnachhallzeit  $EDT_m$  in s als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009) bzw. dem Bassverhältnis *BR* des Grundmodells und der raumakustischen Messung. Die Messwerte sind dargestellt für jede Empfangspostion mit Senderposition eins.



Abbildung 4.3.: Unterschied zwischen der simulierten Schwerpunktszeit  $C_{80m}$  in dB bzw. der Schwerpunktzeit  $T_{sm}$  in ms des Grundmodells als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009) und der raumakustischen Messung. Die Messwerte sind dargestellt für jede Empfangspostion mit Senderposition eins.

Zur Beschreibung der räumlichen Empfindung, durch seitliche Schallreflexion, wird der Seitenschallgrad  $LF_m$  in dieser Arbeit verwendet. Die Ergebnisse der Simulation des Grundmodells für den Seitenschallgrad der Simulation aus Abbildung 4.4 schwanken im Bereich von 0,18 und 0,27.

Werden diese mit der raumakustischen Messung verglichen, welche Werte von 0,21 bis 0,4 erreichen, sind Abweichungen festgestellt worden. Auch die räumliche Änderung dieses Parameters ähnelt nicht der Messung. In der Simulation sind die Seitenschallgrade  $LF_m$  für einen Publikumsbereich nahezu konstant, hierbei ist es irrelevant, ob ein Zuschauer vorn oder hinten Platz nimmt. Die drei Abschnitte (links, mittig und rechts) unterscheiden sich zueinander.

Eine große Fehlerquelle bei der Messung war die Ausrichtung des Messmikrofons mit der Achter-Richtcharakteristik, da zur genauen Erfassung der seitlich einfallenden Reflexionen dieses mit seiner Null-Richtung auf die Schallquelle zeigen musste. Dies könnte die Abweichung begründen.

Aus der raumakustischen Messung aus Abschnitt 3.2 wurde erkenntlich, dass das Stärkemaß  $G_m$  für größere Entfernung zum Orchesterraum kleiner wird. Dieser Zusammenhang wird auch aus der Simulation des Grundmodells erkennbar. Im Gegensatz zur Messung weisen die simulierten Ergebnisse deutlich höhere Werte auf. Die Ergebnisse für das Stärkemaß  $G_m$  liegen im Bereich von 11,9 dB bis 13,4 dB.

Einfluss auf diesen Unterschied hat die durchgeführte Messung aus Abschnitt 3.1 des Schalldruck-Wirkpegels in einer Entfernung von 3 m. Eine genauere Referenzmessung zur Bestimmung des Stärkemaßes wäre die Durchführung dieser Messung im Freifeld.



Abbildung 4.4.: Unterschied zwischen dem simulierten Seitenschallgrad  $LF_m$  bzw. dem Stärkemaß  $G_m$  in dB des Grundmodells als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009) und der raumakustischen Messung. Die Messwerte sind dargestellt für jede Empfangspostion mit Senderposition eins.

#### 4.3. RAVEN Simulation des Grundmodels

In Abbildung 4.5 sind die Fokussierungseffekte der Schulaula, durch die Verwendung der Ray Tracining Strahlenanzeige bei 500 Hz des Sketchup Plugins zu sehen. Hierbei wurden zur Übersicht lediglich acht Partikel losgeschickt, um die Problematik aus Abschnitt 3.2, aufgrund der konkaven Deckenform der Schulaula zu visualisieren.



Abbildung 4.5.: Ray Tracing Untersuchung des Grundmodels unter Aussendung von acht Partikeln der Schallquelle eins. Ansicht von der Rückseite des Modells.

Die Ergebnisse der Simulation des Grundmodells der Schulaula unterstreichen, die in Abschnitt 3.3 beschriebenen Problematiken. Jedoch unterscheiden sich zahlreiche raumakustische Parameter hinsichtlich ihrer Werte zur Messung, sodass der Vergleich der Optimierung im folgendem Abschnitt unter Verwendung der Simulationsergebnisse des Grundmodells stattfindet wird. Dies ist möglich, da sich zwar der Wertebereich der raumakustischen Parameter bei der Simulation des Grundmodells zur Messung unterscheidet, jedoch zeigen die Parameter auch die Änderungen im Raum und somit die dargestellte Problematik auf. Hierbei entstehen einerseits Unterschiede der Werte für die raumakustischen Parameter durch die fehlende Reproduktion der Wellenphänomene des Simulationsprogramms und anderseits können Ungenauigkeiten bei der Messung dazu beitragen.

# 5. Optimierung der Raumakustik

Aus der in Abschnitt 3.3 dargestellten Problematik werden in diesem Abschnitt Maßnahmen zur Umgestaltung des Raumes vorgeschlagen, um diese zu lösen. Durch die Umsetzung dieser Maßnahmen in RAVEN kann im Anschluss eine raumakustische Bewertung im Vergleich zur vorherigen Situation durchgeführt werden.

## 5.1. Optimierungsmaßnahmen

Die konkave Deckenform der Schulaula verursacht aufgrund ihrer geometrischen Form eine Fokussierung des Schalls. Durch diese Fokussierung entstehen Brennpunkte im Raum, an denen die Schallenergie verstärkt eintrifft, andere Raumanteile werden wiederum vernachlässigt.

Die Deckenform spielt in der Raumakustik eine wichtige Rolle. Denn durch ihre Bauweise lässt sich gezielt der Schall im Raum lenken und eine Klarheit bei Musikdarbietungen erzielen. Auch ist das Erreichen einer angemessen Lautstärke für das Publikum durch geregelte Reflexionen an der Deckenoberfläche möglich.

Werden die Ergebnisse aus der raumakustischen Messung aus Abschnitt 3 und der Simulation des Grundmodells der Schulaula 4.3 zusammengefasst, so ist eine unregelmäßige Verteilung der für die Klarheit sehr wichtigen Anfangsreflexionen gegeben. Durch die derzeitige Deckenform der Schulaula, kann diese nicht zur gezielten Schalllenkung für nützliche Reflexionen verwendet werden.

Werden Reflektoren über dem Orchester installiert, so kann durch die gezielte Schalllenkung der frühzeitigen Reflexionen bis 80 ms eine gleichmäßige Verteilung über dem Publikum erreicht werden. Die Funktionsweise von Reflektoren ist abhängig vom Schallquellenabstand  $a_1$ , dem Hörerabstand  $a_2$ , dem Schalleinfallswinkel  $\Theta$  und der Reflektorfläche S. Aus diesen Einflussfaktoren lässt sich nach (Gade, 2007) und mit Gleichung 5.1 eine untere Grenzfrequenz berechnen, ab der eine spiegelnde Reflexion statt findet. Unterhalb dieser Frequenz findet eine Dämpfung von 6 dB pro Oktave statt aufgrund der Beugung, da sich die Reflexion an der ursprünglichen Decke ereignet.

$$f_g = \frac{c}{2 \cdot S \cdot \cos \Theta} \cdot \frac{2 \cdot a_1 \cdot a_2}{a_1 + a_2}$$
(5.1)

Ist eine niedrige Grenzfrequenz erwünscht, so lässt sich dies durch Vergrößerung der Reflektorfläche *S* realisieren.

Große Reflektorenflächen sind im Raum aus ästhetischen Gründen oft nicht gewünscht und in der Aula aufgrund der geringen Raumhöhe nicht zu realisieren, da der Blick zur Bühne versperrt wird.

Um in der Schulaula gezielt auf die Anfangsreflexionen Einfluss zu nehmen, wird ein Reflektorenfeld realisiert, welches trotz Verwendung kleiner Reflektoren auch die tiefen Frequenzen mit berücksichtigt. Dieses wird aus insgesamt 14 Reflektoren mit jeweils einer Breite von 1 m und Länge von 1,5 m in zwei Reihen realisiert. Alle Reflektoren werden mit einer Neigung von 35° angebracht. Durch die Verwendung dieses Reflektorfeldes, lässt sich die Dämpfung unterhalb der Grenzfrequenz eines einzelnen Reflektors von  $f_g \approx 1280$  Hz bei einem Reflexionswinkel von 45° bis zur Grenzfrequenz des Reflektorenfelds von  $f_{g.total} \approx 73$ Hz mit einer Gesamtfläche von  $S_{total} = 24, 42$  m<sup>2</sup> auf 1,3 dB verringern. Die Dämpfung von 1,3 dB ergibt sich dabei, aus dem Verhältnis zwischen der Gesamtfläche aller 14 einzelnen Reflektoren und der Fläche des Relflektorenfeldes. Anschaulich ist dies in Abbildung 5.1 verdeutlicht.



Abbildung 5.1.: Dämpfung aufgrund der Beugung in einem Reflektorfeld (Gade, 2007).

## 5.2. Ergebnisse der Optimierungsmaßnahmen

Zur Reflexion der tiefen Frequenzen muss das schallharte und biegesteife Material der Reflektoren eine flächenbezogene Masse von 40  $\frac{kg}{m^2}$  besitzen.

Aufgrund der niedrigen Raumhöhe kann eine Abdeckung der gesamten Deckenfläche oberhalb des Orchesterraumes mit den oben beschriebenen Reflektoren nicht erzielt werden, da die vorderen Reflektoren zu tief im Raum hängen würden. Hierzu wurden konvexe Reflektoren mit der Breite von 3 m, der Länge von 1,5 m und einer Segmenthöhe von 0,1 m auf eine Raumhöhe von 5,30 m platziert werden.

Durch eine Aufhängung von sieben Reflektoren solcher Art, wird eine Abdeckung der kompletten Decke über dem Orchesterraum gewährleistet, um schädliche Fokussierungseffekte über dem Geschehen zu unterbinden. Durch die konvexe Form wird eine diffuse Reflexion verursacht.

Durch die Verwendung von Reflektoren kann eine gezielte Schalllenkung hervorgerufen werden, ohne das benötigte Volumen des Raumes für seine Nachhallzeit zu verändern, denn der Raum hinter den Reflektoren bleibt weiterhin vorhanden.

Da sich die Raumakustik durch die Besetzung der Schulaula bei musikalischen Vorführungen aufgrund der Absorption des Publikums ändert, sollte eine Bestuhlung der Schulaula mit Polsterstühlen erfolgen. Auch bei einer variablen Besetzung könnte hiermit eine gleichbleibende Nachhallzeit erzielt werden. Die zum Erreichen der Ergebnisse dieser Arbeit verwendeten Polsterstühle weisen, die in Tabelle 5.1 dargestellten Werte, für die Absorption auf.

Tabelle 5.1.: Absorptionsgrade von 125 Hz bis 4000 Hz und der Streugrad bei 707 Hz der Polsterstühle.

Oberfläche	Absorptionsgrad						Streuung	
	[m <sup>3</sup> ]	125	250	500	1000	2000	4000	707 Hz
Polsterstuhl	120	0,15	0,25	0,3	0,35	0,4	0,4	0,6

## 5.2. Ergebnisse der Optimierungsmaßnahmen

Die in Abschnitt 5.1 zusammengetragenen Maßnahmen werden im folgenden in das Grundmodell aus Abschnitt 4.1 eingebaut und deren Simulationsergebnisse präsentiert. Der Einbau der Optimierungsmaßnahmen aus Abschnitt 5.1 ist in Abbildung 5.2 zu sehen.

## 5. Optimierung der Raumakustik



Abbildung 5.2.: Einbau der Optimierungsmaßnahmen in das 3D-Modell der Schulaula.

Durch die Ray Tracining Strahlenanzeige in SketchUp lässt sich die Funktion des über dem Orchesterraum installierten Reflektorenfeldes, zur gezielten Schalllenkung visualisieren. Der Reflexionsweg ist in Abbildung 5.3 zu sehen. Es wird deutlich, dass die Anfangsreflexionen in den hinteren Zuhörerbereich gelangen.



Abbildung 5.3.: Visualisierung der Funktionsweise der Reflektoren über den Orchesterraum durch die Verwendung der Ray Tracining Strahlenanzeige bei 500 Hz und unter Aussendung von fünf Partikeln.

#### 5.2. Ergebnisse der Optimierungsmaßnahmen

Durch die Verwendung von Polsterbestuhlung in der Schulaula wird die Nachhallzeit verkleinert. Der Einzahlwert für die Nachhallzeit  $T_{20}$  fällt auf 1,1 s im besetzten Zustand. Der Frequenzverlauf der örtlich gemittelten Nachhallzeit  $T_{20}$  über alle Empfangsposition für den besetzte Zustand und unter Verwendung der Optimierungsmaßnahmen ist in Abbildung 5.4 zu sehen.

Trotz niedriger Nachhallzeit wird die Verwendung der Polsterstühle empfohlen, da somit eine gleichbleibende Nachhallzeit bei variabler Besetzung und bei Proben im unbesetzten Zustand gewährleistet wird. Die Gefahr der fehlenden Lautstärke im Raum, durch eine niedrige Nachhallzeit, wird durch die Verwendung der Reflektoren unterbunden, da genügend Reflexionen statt finden. Des Weiteren wird der nach DIN 18041 (2016) empfohlene Abfall der Nachhallzeit im hohen Frequenzbereich für die Schulaula weiterhin eingehalten.



Abbildung 5.4.: Nachhallzeit  $T_{20}$  im besetzten Zustand nach Einbau der Optimierungsmaßnahmen im Vergleich zur Simulation des Grundmodells.

Das aus der örtlich gemittelten Nachhallzeit im besetzten Zustand berechnete Bassverhältnis *BR*, verringert sich auf einen Wert von 0,94 im Vergleich zum Bassverhältnis *BR* = 1,02 vom Grundmodell. Es bildet sich ein kaum relevanter Unterschied zum ursprünglichen Zustand der Schulaula aus, sodass die Klangfarbe der Nachhallzeit identisch bleibt. Aus diesem Grund wird auf eine Veranschaulichung für jede Empfängerposition verzichtet. Der aus Abschnitt 2.1.2 angestrebte Bereich von 1,0 bis 1,3 für das Bassverhältnis wird geringfügig unterschritten.

Im Folgenden werden alle weiteren Ergebnisse, der in dieser Arbeit verwendeten raumakustischen Parametern der Optimierungsmaßnahmen mit den Ergebnissen des Grundmodells unter Angabe des Einzelfrequenz-Mittelwertes nach DIN EN ISO 3382 (2009) für jede Messposition grafisch dargestellt. Die Werte für die jeweiligen Parameter sind tabellarisch im Anhang A.2 aufgeführt. Des Weiteren können die erstellten Energiereflektogramme der Simulation im Anhang A.1 eingesehen werden.

In Abbildung 5.5 ist das Ergebnis der platzbezogenen Anfangsnachhallzeit  $EDT_m$  zu sehen. Für jeden Sitzbereich ergibt sich ein Wert von nahe zu eins für die Anfangsnachhallzeit  $EDT_m$ . Dies entspricht der örtlich gemittelten Nachhallzeit  $T_{20}$ , sodass der Zuhörer überall eine identische Nachhallzeit wahrnehmen wird.



Abbildung 5.5.: Ergbenis der simulierten Anfangsnachhallzeit  $EDT_m$  in s als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009) der Optimierungsmaßnahmen im Vergleich zum Grundmodell. Die Ergebnisse sind für jede Empfangspostion mit Senderposition eins dargestellt.

Zur Überprüfung der Wirkung der eingebauten Deckenreflektoren werden die in Abbildung 5.6 dargestellten Ergebnisse des Klarheitsmaßes  $C_{80m}$  und der Schwerpunktzeit  $T_{sm}$  verwendet. Wie bereits im Abschnitt 2.1 beschrieben, berücksichtigen diese beiden raumakustischen Parameter den Einfluss des frühzeitigen Schalls auf den Zuhörer und somit die mangelnde Anfangsreflexionen in der ursprünglichen Raumform der Schulaula.

Die Werte des Klarheitsmaßes  $C_{80m}$  bewegen sich in einem Bereich von 4,8 dB bis 5,7 dB. Somit liegt der Unterschied zwischen den Werten der Messpositionen innerhalb der Unterscheidungsschwelle, welche 1 dB beträgt (DIN EN ISO 3382, 2009).

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der einzelnen Sitzabschnitte, sind auch hier Unterschiede

#### 5.2. Ergebnisse der Optimierungsmaßnahmen

für einzelne Empfängerpositionen innerhalb der Unterscheidungsschwelle, sodass der Zuhörer an allen Plätzen eine gleichbleibende Durchsichtigkeit von Musikdarbietungen erfährt. Durch die Dominanz der frühzeitigen Reflexionen, ergibt sich ein hoher Eindruck der Klarheit, da höhere Werte für das Klarheitsmaß  $C_{80m}$  erreicht werden als im Ausgangspunkt der Schulaula. Durch niedrige Werte der Schwerpunktzeit  $T_{sm}$ , wird ein klarer Schall im Raum



Abbildung 5.6.: Ergebnis des simulierten Klarheitsmaßes  $C_{80m}$  in dB und der Schwerpuntkzeit  $T_{sm}$  als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009) der Optimierungsmaßnahmen im Vergleich zum Grundmodell. Die Ergebnisse sind für jede Empfangspostion mit Senderposition eins dargestellt.

erzielt, da der Einfluss der Anfangsreflexionen größer ist.

Die in Abbildung 5.6 zu sehenden Ergebnisse der Schwerpunktzeit  $T_{sm}$  für die Optimierungsmaßnahmen bewegen sich mit maximal 10 ms Differenz zu  $T_{sm} = 60$  ms. Die Unterscheidungsschwelle für die Schwerpunktzeit beträgt 10 ms und wird hierbei eingehalten. Die Abbildung 5.6 verdeutlicht, dass sich durch die Optimierungsmaßnahmen die Werte für die Schwerpuntkzeit im Vergleich zu den Ergebnissen des Grundmodells verringert haben. Es ergeben sich nur noch Änderungen der Werte für entferntere Plätze zum Orchesterraum, die durch den Menschen nicht mehr wahrgenommen werden, da sie innerhalb der Unterscheidungsschwelle liegen.

Zur Beurteilung, ob die Optimierungsmaßnahmen zu Lösung der fehlenden Lautstärke im hinteren Bereich im Vergleich zu vorderen Sitzbereichen der Schulaula dazu beitragen, wird das in Abbildung 5.7 dargestellte Stärkemaß  $G_m$  verwendet. Das Stärkemaß weist nach dem Einbau der Optimierungsmaßnahmen Werte von 11,3 dB bis 12,9 dB auf.

Das Stärkemaß besitzt nach DIN EN ISO 3382 (2009) eine Unterscheidungsschwelle von 1 dB. Die Schwankungen des Stärkemaßes  $G_m$  nach der Optimierung für einzelne Publikumsabschnitte überschreiten minimal die Unterscheidungsschwelle. Dennoch kann von einer für den Zuhörer wahrgenommenen konstanten Lautstärke ausgegangen werden, da die Unterschiede nicht größer als 2 dB sind. An Empfängerposition 4 wird ein im Vergleich zu den anderen Werten ein zu hoher Wert erreicht. Der Empfangsplatz 4 liegt in unmittelbarer Nähe zur verwendeten Schallquelle, womit sich die Abweichung begründen lässt.



Abbildung 5.7.: Ergbenis des simulierten Stärkemaßes  $G_m$  in dB als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009) der Optimierungsmaßnahmen im Vergleich zum Grundmodell. Die Ergebnisse sind für jede Empfangspostion mit Senderposition eins dargestellt.

Zur Bewertung des Einflusses der Umgestaltung der Schulaula, auf die vom Publikum wahrgenommene Räumlichkeit, wird das Ergebnis aus Abbildung 5.8 des Seitenschallgrades im Vergleich zum Simulationsergebnisses des Grundmodells hinzugezogen.

Die Veränderung des Seitenschallgrades  $LF_m$  durch die Optimierungsmaßnahmen führt dazu, dass sich der Seitenschallgrad  $LF_m$  für alle Empfängerpositionen in einem Sitzabschnitt nahezu konstant verhält. Der maximale Unterschied im Raum für beträgt ungefähr 0,1, dieser liegt über der Unterscheidungsschwelle von 0,05. Jedoch liegt der Unterschied der Werte eines Sitzabschnittes innerhalb der Unterscheidungsschwelle, sodass sich für jeden einzelnen Sitzabschnitt eine gleiche Räumlichkeit ergibt. Wird die Unterscheidungsschwelle mitberücksichtigt, so liegen alle Sitzbereich in dem aus Abschnitt 2.1.5 zufriedenstellenden Wertebereiches.

## 5.2. Ergebnisse der Optimierungsmaßnahmen



Abbildung 5.8.: Ergbenis des simulierten Seitenschallgrades  $LF_m$  als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009) der Optimierungsmaßnahmen im Vergleich zum Grundmodell. Die Ergebnisse sind für jede Empfangspostion mit Senderposition eins dargestellt.

# 6. Zusammenfassung und Diskussion

In dieser Arbeit wurde eine raumakustische Optimierung der Schulaula des Heinz-Berggruen Gymnasiums durchgeführt.

Anhand einer Messung, wurde die zur mangelnden akustischen Wirksamkeites des Raumes beizutragende Problematik festgestellt. Die über den ganzen Raum verlaufende konkav geformte Decke verursacht aufgrund ihrer Oberflächenform Fokussierungseffekte, die maßgeblich zur Störungen beitragen.

Durch die Verwendung der raumakustischen Parameter in dieser Arbeit wurde deutlich, dass durch die ursprüngliche Deckenform eine unzureichende Versorgung des Publikums mit frühzeitigen Reflexionen erfolgt. Durch die Verringerung des Klarheitsmaßes und Erhöung der Schwerpunktzeit für entferntere Publikumsplätze vom Orchesterraum, wird eine gleichmäßige über den Raum verteilte Durchsichtigkeit und ein Gleichgewicht zwischen Klarheit und Nachhall nicht gewährleistet. Auch die für die Zuhörenden empfundene Lautstärke, die durch das Stärkemaß beschrieben wird, ist für jeden Sitzbereich anderes.

Die Nachhallzeit  $T_{20}$  für die ursprüngliche Form der Schulaula im besetzten Zustand beträgt 1,52 s. Dieser Wert unterschreitet bereits die Anforderung an die Nachhallzeit für die Schulaula. Insbesondere die Anpassung der Anfangsnachhallzeit ist nötig, da hier eine Unregelmäßigkeit vorliegt und somit der wahrgenommene Nachhall des Zuhörenden schwankt. Zum Erreichen der Ziele einer raumakustischen Optimierung und zum Lösen der beschriebenen Problematik, sind entsprechende Maßnahmen in dieser Arbeit vorgestellt worden. Um eine Bewertung der Maßnahmen durchführen zu können, wurde zunächst die festgestellte Problematik unter Verwendung der Simulationsergebnisse des Grundmodells der Schulaula verifiziert. Die Simulationsergebnisse bestätigten die Ungleichmäßigkeiten der oben genanten raumakustischen Parameter, jedoch gab es bei einigen Parametern Abweichungen hinsichtlich ihrer Werte.

Hierzu können Fehler aus der Messung, sowie die mangelnde Modellierung der Beugungsund Streuungseffekte der Simulation, dazu beitragen. Auch die Verwendung eines Modells zu Bestimmung der frequenzabhängigen Streugrade der Oberflächenmaterialien ist eine große Fehlerquelle. Insbesondere die starke Abhängigkeit der raumakustischen Parameter auf die Entfernung zur Schallquelle muss berücksichtigt werden.

Um dennoch eine Beurteilung der Optimierungsmaßnahmen zu absolvieren, wurden die Ergebnisse der Simulation der Maßnahmen, mit denen der Simulation des Grundmodells verglichen.

Insbesondere die Umgestaltung der Decke unter Verwendung von Deckenreflektoren führte zur Lösung der ungleichmäßigen Verteilung der Durchsichtigkeit, hierbei musste die geringe Raumhöhe und der Blick zur Bühne, welche sich hinter dem Orchesterraum befindet, beachtet werden.

Die Verteilung der Anfangsreflexionen im Raum erfolgt nun gleichbleibend. Durch die Verdeckung der ursprünglichen Deckenform über dem Orchesterraum wird die Entstehung von Fokussierungseffekten über dem Musikgeschehnis unterbunden.

Die Zuhörenden erfahren ein hohes Maß an Klarheit und an jedem Sitzplatz eine gleichbleibende Lautstärke.

Eine ideale Umgestaltung der Decke zu einer stufenförmigen, wie in Abbildung 6.1 zu sehen, ist aufgrund der geringen Raumhöhe in der Schulaula nicht möglich. Dies würde zu einer noch präziseren Schalllenkung führen.



Abbildung 6.1.: Ideale Deckenstruktur zur Verhinderung von Fokssuierungseffekten und präziser Schalllenkung der Anfangsreflexionen. Abbildung übernommen aus Ahnert und Tennhardt (2008).

Zusätzlich zur Umgestaltung der Decke, wurde eine Bestuhlung aus Polsterstühlen durchgeführt. Dies führt zu einer gleichbleibenden Nachhallzeit im unbesetzten Zustand. Da die ursprüngliche Deckenform über den Publikumsbereich erhalten bleibt, besteht weiterhin eine geringe Gefahr, dass abgeschwächte, spätere Reflexionen zu Fokussierungseffekten beitragen. Diese werden durch die Absorption der Polsterstühle bzw. im besetzten Zustand des Publikums ausgelöscht.

Durch die Bestuhlung wird die Nachhallzeit weiter verringert. Ein Zusatz wäre hierbei, die Anwendung weiterer Absorber, die gezielt im tiefen Freuqzenbereich und bei ca. 500 Hz agieren, um eine gleichbleibende Nachhallzeit bei jeder Frequenz zu erreichen. Jedoch würde die Nachhallzeit weiter sinken. Der empfohlene Abfall im hohen Frequenzbereich bleibt trotz niederiger Nachhallzeit erhalten. Da sich die Anfangsnachhallzeit des Raumes nach Einbau der Optimierungsmaßnahme an jedem Sitzplatz gleich verhält und der Nachhallzeit  $T_{20}$  ähnelt, werden keine weiteren Maßnahmen zur Veränderung der gewöhnlichen Nachhallzeit getroffen.

Die zur Räumlichkeit beitragenden seitlichen Reflexionen ändern sich durch die Veränderung des Deckenbereiches nur minimal. Da die größte Fläche der Seitenwände der Schulaula aus Fenstern besteht, ist eine Umgestaltung dieser für den Seitenschallgrad relevanten Flächen nicht möglich. Hier wäre ein strukturförmiger Aufbau der Wand geeignet, um einerseits seitliche Reflexionen gezielt zu lenken und andererseits den Ausbau eines gleichmäßigen Schallfeldes im Raum zu unterstützen.

Trotz der genannten Einschränkungen der geometrischen Akustik und Methodiken einer akustischen Computersimulation und den architektonischen Umständen der Schulaula des Heinz-Berggruen Gymnasiums, konnte in dieser Arbeit Maßnahmen gefunden werden, um eine raumakustische Optimierung durchführen zu können. Werden Maßnahmen umgesetzt, so ist eine vorherige statische und architektonische Begutachtung auszuführen.

# Abbildungsverzeichnis

2.1.	Schematische Raumimpulsantwort. Abbildung aus Vorländer und Witew (2009)	4
2.2.	Spiegelung höher Ordnung durch Reflexion einer virtuellen Schallquelle (Chéen	-
	ne, 2008, S.221)	9
3.1.	Messaufbau der raumakustischen Messung.	14
3.2.	Grundriss der Schulaula. Der Sitzbereich ist in drei Abschnitte unterteilt:	
	links, mittig und rechts. In Jedem Sitzbereich wurden drei Empfangspositio-	
	nen für die Messung benutzt. Die beiden Senderpositionen befinden sich vor	
	der Bühne, im Orchesterraum.	15
3.3.	Gemessenes Energiereflektogram bis zur 400 ms an Empfängerposition eins	
	mit der Senderposition eins.	17
3.4.	Gemessenes Energiereflektogram bis zur 400 ms an Empfängerposition drei	
	mit der Senderposition eins.	17
3.5.	Ausschnitt der Raumimpulsantwort an Empfängerposition zwei mit Sender-	
	position eins.	18
3.6.	Fokussierungseffekte bei konkaven Decken. Abbildung aus Gade (2007).	18
3.7.	Gemessen Nachhallzeit $T_{20}$ in s der Schulaula	20
4.1.	Das erstellte Modell der Schulaula des Heinz-Berggruen Gymnasiums unter	
	Verwendung der CAD-Software SketchUp.	26
4.2.	Unterschied zwischen der simulierten Anfangsnachhallzeit $EDT_m$ in s als	
	Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009) bzw. dem Bass-	
	verhältnis BR des Grundmodells und der raumakustischen Messung. Die	
	Messwerte sind dargestellt für jede Empfangspostion mit Senderposition eins.	33
4.3.	Unterschied zwischen der simulierten Schwerpunktszeit $C_{80m}$ in dB bzw. der	
	Schwerpunktzeit $T_{sm}$ in ms des Grundmodells als Einzelfrequenz-Mittelwert	
	nach DIN EN ISO 3382 (2009) und der raumakustischen Messung. Die	
	Messwerte sind dargestellt für jede Empfangspostion mit Senderposition eins.	33

4.4.	Unterschied zwischen dem simulierten Seitenschallgrad $LF_m$ bzw. dem Stär- kemaß $G_m$ in dB des Grundmodells als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009) und der raumakustischen Messung. Die Messwerte sind	
	dargestellt für jede Empfangspostion mit Senderposition eins	34
4.5.	Ray Tracing Untersuchung des Grundmodels unter Aussendung von acht Partikeln der Schallquelle eins. Ansicht von der Rückseite des Modells	35
5.1.	Dämpfung aufgrund der Beugung in einem Reflektorfeld (Gade, 2007)	38
5.2.	Einbau der Optimierungsmaßnahmen in das 3D-Modell der Schulaula	40
5.3.	Visualisierung der Funktionsweise der Reflektoren über den Orchesterraum	
	durch die Verwendung der Ray Tracining Strahlenanzeige bei 500 Hz und	
	unter Aussendung von fünf Partikeln.	40
5.4.	Nachhallzeit $T_{20}$ im besetzten Zustand nach Einbau der Optimierungsmaß-	
	nahmen im Vergleich zur Simulation des Grundmodells	41
5.5.	Ergbenis der simulierten Anfangsnachhallzeit $EDT_m$ in s als Einzelfrequenz-	
	Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009) der Optimierungsmaßnahmen im	
	Vergleich zum Grundmodell. Die Ergebnisse sind für jede Empfangspostion	
	mit Senderposition eins dargestellt.	42
5.6.	Ergebnis des simulierten Klarheitsmaßes $C_{80m}$ in dB und der Schwerpuntkzeit	
	$T_{sm}$ als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009) der Opti-	
	mierungsmaßnahmen im Vergleich zum Grundmodell. Die Ergebnisse sind	
	für jede Empfangspostion mit Senderposition eins dargestellt	43
5.7.	Ergbenis des simulierten Stärkemaßes $G_m$ in dB als Einzelfrequenz-Mittelwert	
	nach DIN EN ISO 3382 (2009) der Optimierungsmaßnahmen im Vergleich	
	zum Grundmodell. Die Ergebnisse sind für jede Empfangspostion mit Sen-	
	derposition eins dargestellt.	44
5.8.	Ergbenis des simulierten Seitenschallgrades $LF_m$ als Einzelfrequenz-Mittelwert	
	nach DIN EN ISO 3382 (2009) der Optimierungsmaßnahmen im Vergleich	
	zum Grundmodell. Die Ergebnisse sind für jede Empfangspostion mit Sen-	
	derposition eins dargestellt.	45
6.1.	Ideale Deckenstruktur zur Verhinderung von Fokssuierungseffekten und prä-	
	ziser Schalllenkung der Anfangsreflexionen. Abbildung übernommen aus	
	Ahnert und Tennhardt (2008)	48
A.1.	Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 1 mit Senderposition 1.	61

A.2. Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 2 mit Senderposition 1.	62
A.3. Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 3 mit Senderposition 1.	62
A.4. Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 4 mit Senderposition 1.	63
A.5. Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 5 mit Senderposition 1.	63
A.6. Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 6 mit Senderposition 1.	64
A.7. Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 7 mit Senderposition 1.	64
A.8. Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 8 mit Senderposition 1.	65
A.9. Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 9 mit Senderposition 1.	65
A.10. Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangs-	
position 1 mit Senderposition 1	66
A.11. Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangs-	
position 2 mit Senderposition 1	66
A.12. Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangs-	
position 3 mit Senderposition 1	67
A.13. Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangs-	
position 4 mit Senderposition 1	67
A.14. Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangs-	
position 5 mit Senderposition 1	68
A.15. Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangs-	
position 6 mit Senderposition 1	68
A.16. Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangs-	
position 7 mit Senderposition 1	69
A.17. Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangs-	
position 8 mit Senderposition 1	69
A.18. Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangs-	
position 9 mit Senderposition 1	70
A.19. Fotos der Schulaula des Heinz-Berggruen Gymnasiums in Berlin.	72
A.20. Raumakustische Messung in der Schulaula. Abgebildet ist der verwendete	
Dodekaeder-Lautsprecher und das Kondensatormikrofon mit einer Richtcha-	
rakteristik einer Kugel.	73
A.21.Grundriss der Schulaula.	73
A.22. Aufbau des beiliegenden Datenträgers	74

# Tabellenverzeichnis

3.1.	Zusätzliche Schallabsorptionsfläche (DIN 18041, 2016, S.24).	19
3.2.	Werte der gemessene Nachhallzeit $T_{20}$ im unbesetzten und besetzten Zustand der Schulaula.	20
3.3.	Anfangsnachhallzeit $EDT_m$ in s als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009). Dargestellt für jede Empfangspostion mit Senderposition	01
<b>.</b>		21
3.4.	sition eins	21
3.5.	Deutlichkeitsmaß $C_{80m}$ in dB und Schwerpunktzeit $T_{sm}$ in ms als Einzelfrequenze Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009). Dargestellt für jede Empfangs- postion mit der Senderposition eins.	- 22
3.6.	Seitenschallgrad $LF_m$ als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009). Dargestellt für jede Empfangspostion mit der Senderposition eins.	22
3.7.	Stärkemaß $G_m$ in dB als Einzelfrequenz-Mittelwert nach DIN EN ISO 3382 (2009). Dargestellt für jede Empfangspostion mit der Senderposition eins.	23
4.1.	Werte der Absorptionsgrade von 125 Hz bis 4000 Hz und der Streugrade bei 707 Hz der Oberflächenmaterialien des 3D-Modells der Schulaula	27
4.2.	Simulierte Nachhallzeit $T_{20}$ im unbesetzten und besetzten Zustand der Schulau- la des Grundmodells.	32
5.1.	Absorptionsgrade von 125 Hz bis 4000 Hz und der Streugrad bei 707 Hz der Polsterstühle.	39
A.1.	Anfangsnachhallzeit $EDT_m$ in s als Einzelfrequenz-Mittelwertbildung nach DIN EN ISO 3382 (2009) für die Optimierungsmaßnahmen. Dargestellt für jede Empfangspostion mit Senderposition eins.	70

A.4.	Deutlichkeitsmaß $C_{80m}$ in dB und Schwerpunktzeit $T_{sm}$ in ms als Einzelfrequenz	-
	Mittelwertbildung nach DIN EN ISO 3382 (2009) für die Optimierungsmaß-	
	nahmen. Dargestellt für jede Empfangspostion mit der Senderposition eins.	70
A.2.	Bassverhältnis BR für die Optimierungsmaßnahmen. Dargestellt für jede Emp-	
	fangspostion mit der Senderposition eins.	71
A.3.	Seitenschallgrad $LF_m$ als Einzelfrequenz-Mittelwertbildung nach DIN EN	
	ISO 3382 (2009) für die Optimierungsmaßnahmen. Dargestellt für jede Emp-	
	fangspostion mit der Senderposition eins.	71
A.5.	Stärkemaß $G_m$ in dB als Einzelfrequenz-Mittelwertbildung nach DIN EN	
	ISO 3382 (2009) für die Optimierungsmaßnahmen. Dargestellt für jede Emp-	
	fangspostion mit der Senderposition eins.	71

## Literaturverzeichnis

- Ackermann, David und Maximilian Ilse (2015): *The Simulation of Monaural and Binaural Transfer Functions for a Ground Truth for Room Acoustical Analysis and Perception (GRAP).* Masterarbeit, Technische Universität, Fakultät 1, Fachgebiet Kommunikationswissenschaft, Berlin.
- Ahnert, Wolfgang und Hans-Peter Tennhardt (2008): "Raumakustik." In: Stefan Weinzierl (Hrg.) Handbuch der Audiotechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 181–266.
- Aspöck, Lukas; Sönke Pelzer; Frank Wefers und Michael Vorländer (2014): "A Real-Time Auralization Plugin for Architectural Design and Education."
- Barron, Michael (1993): Auditorium acoustics and architectural design. London [u.a.].
- Beranek, Leo L. (2004): *Concert halls and opera houses : music, acoustics, and architecture.* New York [u.a.]: Springer.
- Böhm, Christoph (2015): *Entwicklung einer Versuchsumgebung zur Auralisation von virtuellen Konzerträumen für Musiker*. Masterarbeit, Technische Universität, Fakultät 1, Fachgebiet Kommunikationswissenschaft, Berlin.
- Chéenne, Dominique J. (2008): "Chapter 9 Modeling and Auralization A2 Ballou, Glen M." In: *Handbook for Sound Engineers (Fourth Edition)*. Oxford: Focal Press, S. 213–237.
- DIN 18041 (2016): Hörsamkeit in Räumen Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 3382 (2009): Akustik Messung von Paramtern der Raumakustik Teil 1: Aufführungsräume. Berlin: Beuth.

- Fasold, Wolfgang und Eva Veres (2003): Schallschutz und Raumakustik in der Praxis : Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen. Berlin: Huss-Medien, Verl. Bauwesen.
- Fuchs, Helmut V. (2010): Schallabsorber und Schalldämpfer : innovative akustische Konzepte und Bauteile mit praktischen Anwendungen in konkreten Beispielen. Berlin: Springer.
- Gade, Anders (2007): "Acoustics in Halls for Speech and Music." In: Thomas D. Rossing (Hrg.) *Springer Handbook of Acoustics*. New York, NY: Springer New York, S. 301–350.
- Krokstad, A.; S. Strom und S. Sørsdal (1968): "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique." In: *Journal of Sound and Vibration*, 8(1) S. 118 125.
- Odeon Room Acoustics Software Manual (2013): Odeon Room Acoustics Software Version 12 User Manual: Basics, Industrial, Auditorium and Combined Editors.
- Physikalische-Technische Bundesanstalt (2012): *Absorptionsgradtabelle*. Online. URL http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung\_ 1/1.6\_schall/1.63/abstab\_wf.zip.
- Rindel, Jens Holger (1997): "Computer simulation techniques for acoustical design of rooms
  How to treat reflections in sound field simulation." In: *Proceedings of ASVA 97*. The Acoustical Society of Japan and The Institute of Noise Control Eingeering of Japan, S. 201–208.
- Rindel, J.H. (1991): "Design of new ceiling reflectors for improved ensemble in a concert hall." In: *Applied Acoustics*, 34(1) S. 7 17.
- Schröder, Dirk und Michael Vorländer (2011): "RAVEN: A real-time framework for the auralization of interactive virtual environments." vol. 97. Stuttgart: Hirzel, S. 103–103.
- Vorländer, Michael (1989): "Simulation of the transient and stead-state sound propagation in rooms using a new combined ray-racing/image source algorithm." In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 86(1) S. 172–178.
- Vorländer, Michael (2008): Auralization : fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality. Berlin: Springer.
- Vorländer, Michael (2014): "Virtual Acoustics." In: Archives of Acoustics, 39(3) S. 307–318.
#### Literaturverzeichnis

- Vorländer, Michael und Ingo Witew (2009): "Raumakustik und Beschallungstechnik." In: *Bauphysik-Kalender 2009*. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, S. 469–514.
- Weinzierl, Stefan (2008): "Aufnahmeverfahren." In: Stefan Weinzierl (Hrg.) *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 747–812.
- Werner, Ulf-Jürgen (2009): Schallschutz und Raumakustik : Handbuch für Theorie und Praxis. Berlin: Bauwerk.

#### A.1. Plots

In diesem Abschnitt finden sich alle aufgezeichneten Raumimpulsantworten aus Abschnitt 3 wieder, die zur Auswertung benötigt worden sind. Alle weiteren Raumimpulsantworten für die Senderposition 2 finden sich auf dem beigefügten Datenträger wieder. Des Weiteren sind die in Abschnitt 5.2 erstellten Energiereflektogramme der Simulation der Optimierungsmaßnahmen zu sehen.



Abbildung A.1.: Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 1 mit Senderposition 1.



Abbildung A.2.: Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 2 mit Senderposition 1.



Abbildung A.3.: Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 3 mit Senderposition 1.



Abbildung A.4.: Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 4 mit Senderposition 1.



Abbildung A.5.: Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 5 mit Senderposition 1.



Abbildung A.6.: Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 6 mit Senderposition 1.



Abbildung A.7.: Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 7 mit Senderposition 1.



Abbildung A.8.: Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 8 mit Senderposition 1.



Abbildung A.9.: Gemessene Raumimpulsantwort an Empfangsposition 9 mit Senderposition 1.



Abbildung A.10.: Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangsposition 1 mit Senderposition 1.



Abbildung A.11.: Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangsposition 2 mit Senderposition 1.

A.1. Plots



Abbildung A.12.: Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangsposition 3 mit Senderposition 1.



Abbildung A.13.: Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangsposition 4 mit Senderposition 1.



Abbildung A.14.: Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangsposition 5 mit Senderposition 1.



Abbildung A.15.: Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangsposition 6 mit Senderposition 1.

A.1. Plots



Abbildung A.16.: Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangsposition 7 mit Senderposition 1.



Abbildung A.17.: Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangsposition 8 mit Senderposition 1.



Abbildung A.18.: Energiereflektorgramm der Umbaumaßnahmen der Schulaula an Empfangsposition 9 mit Senderposition 1.

### A.2. Werte

Tabelle A.1.: Anfangsnachhallzeit  $EDT_m$  in s als Einzelfrequenz-Mittelwertbildung nach DIN EN ISO 3382 (2009) für die Optimierungsmaßnahmen. Dargestellt für jede Empfangspostion mit Senderposition eins.

Empfänger	$EDT_m$ [s]	Empfänger	$EDT_m$ [s]	Empfänger	$EDT_m$ [s]
E7	0,99	E1	1,00	E4	1,02
E8	0,98	E2	0,97	E5	1,00
E9	0,97	E3	0,98	E6	1, 02

Tabelle A.4.: Deutlichkeitsmaß  $C_{80m}$  in dB und Schwerpunktzeit  $T_{sm}$  in ms als Einzelfrequenz-Mittelwertbildung nach DIN EN ISO 3382 (2009) für die Optimierungsmaßnahmen. Dargestellt für jede Empfangspostion mit der Senderposition eins.

Empfänger	C <sub>80m</sub> [dB]	T <sub>sm</sub> [ms]	Empfänger	C <sub>80m</sub> [dB]	T <sub>sm</sub> [ms]	Empfänger	C <sub>80m</sub> [dB]	T <sub>sm</sub> [ms]
E7	5,2	66	E1	4,9	65	E4	5,7	59
E8	4,9	69	E2	5,0	68	E5	5,0	65
E9	4,8	69	E3	5,0	69	E6	5,0	67

A.2. Werte

\_

Tabelle A.2.: Bassverhältnis *BR* für die Optimierungsmaßnahmen. Dargestellt für jede Empfangspostion mit der Senderposition eins.

Empfänger	BR	Empfänger	BR	Empfänger	BR
E7	0,88	E1	0,91	E4	0,93
E8	0,87	E2	0,92	E5	0,93
E9	0,88	E3	0,94	E6	0,92

Tabelle A.3.: Seitenschallgrad  $LF_m$  als Einzelfrequenz-Mittelwertbildung nach DIN EN ISO3382 (2009) für die Optimierungsmaßnahmen. Dargestellt für jede Empfangspostion mit der Senderposition eins.

Empfänger	$LF_m$	Empfänger	$LF_m$	Empfänger	$LF_m$
E7	0,268	E1	0,205	E4	0,194
E8	0,281	E2	0,220	E5	0,183
E9	0,286	E3	0,208	E6	0,194

Tabelle A.5.: Stärkemaß  $G_m$  in dB als Einzelfrequenz-Mittelwertbildung nach DIN EN ISO 3382 (2009) für die Optimierungsmaßnahmen. Dargestellt für jede Empfangspostion mit der Senderposition eins.

Empfänger	$G_m$ [dB]	Empfänger	$G_m$ [dB]	Empfänger	$G_m$ [dB]
E7	12,2	E1	12,7	E4	12,9
E8	11,6	E2	11,8	E5	11,9
E9	11,4	E3	11,3	E6	11,4

## A.3. Fotos



(a) Abgebildet ist der Blick von der Bühne in die (b) Abgebildet ist der Blick vom Publikum auf den Schulaula herein. Orchesterraum und die dahinter liegende Bühne.



(c) Abgebildet ist die Rückwand der Schulaula. Der obere Teil der Rückwand weist einen hohen Absorptionsgrad auf.

Abbildung A.19.: Fotos der Schulaula des Heinz-Berggruen Gymnasiums in Berlin.

#### A.3. Fotos



Abbildung A.20.: Raumakustische Messung in der Schulaula. Abgebildet ist der verwendete Dodekaeder-Lautsprecher und das Kondensatormikrofon mit einer Richtcharakteristik einer Kugel.



Abbildung A.21.: Grundriss der Schulaula.

## A.4. Aufbau des Datenträgers



Abbildung A.22.: Aufbau des beiliegenden Datenträgers.