

# **Gitarren-Mikrofonierung - Optimierung einer inwendigen Anordnung**

**Von der musikalischen Akustik bis zur Analyse von  
Impulsantworten im Hohlraum der Gitarre**

**Bachelor-Thesis**  
zur Erlangung des akademischen Grades B.Sc.

**Patrick Dadaczynski**  
2079140



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Fakultät Design, Medien und Information  
Department Medientechnik

Erstprüfer: Prof. Dr. Robert Mores

Zweitprüfer: Prof. Dr. Eva Wilk

Hamburg, 24. 3. 2016

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Akustik der Gitarre</b>	<b>6</b>
2.1	Die Saite . . . . .	6
2.2	Der Klang der Gitarre . . . . .	6
2.3	Die Grundabstimmung . . . . .	9
2.4	Mittelfrequenzen . . . . .	10
2.5	Konstruktion der Gitarre . . . . .	11
2.5.1	Decke . . . . .	11
2.5.2	Steg . . . . .	12
2.5.3	Hohlraum . . . . .	13
2.6	Aktuelle Entwicklungen im Gitarrenbau . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Verstärkungsmöglichkeiten bei der akustischen Gitarre</b>	<b>15</b>
3.1	Mikrofonierung . . . . .	15
3.1.1	Mikrofonierung vor dem Instrument . . . . .	15
3.1.2	Mikrofonierung im Resonanzkörper . . . . .	16
3.2	Tonabnehmer . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Untersuchungen von C. Gough zur Violine</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>Analyse von Musikinstrumenten</b>	<b>21</b>
5.1	Mathematische Auswertung der Messungen . . . . .	21
<b>6</b>	<b>Messaufbau und Messdaten</b>	<b>24</b>
6.1	Hohlraum . . . . .	24
6.1.1	Messversuch im Hohlraum . . . . .	24
6.2	Messung des nach außen abgestrahlten Schalls . . . . .	26
6.2.1	Abstrahlverhalten von Gitarren . . . . .	27
6.2.2	Hallraum FH Lübeck . . . . .	28
6.2.3	Messversuch im Hallraum . . . . .	28
<b>7</b>	<b>Auswertung</b>	<b>30</b>
<b>8</b>	<b>Weitere Probleme einer inwendigen Mikrofonierung</b>	<b>33</b>

*Inhaltsverzeichnis*

<b>9 Ergebnis und Fazit</b>	<b>35</b>
<b>A Material</b>	<b>37</b>
A.1 Datenblatt. . . . .	37
A.2 Datenträger . . . . .	37
A.3 Grafiken . . . . .	38
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>39</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>41</b>

## **Abstract**

In the present work measurements for optimizing a microphone position are carried out in the cavity of the acoustic guitar. In addition to the measured experimental basis for understanding of the instrument and for measuring instruments are developed. The motivation is based on the shortcomings of the current options for the electrical amplification of guitars and personal interest in this instrument, which grew out of several own audio recordings and live mixes.

## **Zusammenfassung**

In der vorliegenden Arbeit soll durch einen Messversuch eine Optimierung der Position des Mikrofons im Hohlraum der akustischen Gitarre vorgenommen werden. Dazu werden neben dem Messversuch Grundlagen zum Verständnis des Instruments und zur Vermessung von Instrumenten erarbeitet. Die Motivation beruht auf den Unzulänglichkeiten der aktuellen Möglichkeiten zur elektrischen Verstärkung von Gitarren und dem persönlichen Interesse an diesem Instrument, welches aus diversen eigenen Audioaufnahmen und Live-Mischungen, entstand.

# 1 Einleitung

Die elektrische Verstärkung von akustischen Gitarren ist für viele Musiker ein schwieriges und kontrovers diskutiertes Thema. Der komplexe Klang der Gitarre wird für Aufführungszwecke gerade im Popbereich durch Schallwandler jeglicher Art verstärkt an das Publikum weitergeben. Das zu hörende Ergebnis ist dabei aber oft ernüchternd und entspricht nicht dem natürlichen Höreindruck einer Gitarre. Für viele Gitarristen ist die Suche nach dem perfekten Klangüberträger endlos. Die Vielzahl der Tonabnehmer und Systeme auf dem Markt zeigt, dass sich noch kein idealer Wandler durchgesetzt hat. Diese Arbeit versucht durch Messungen von Resonanzkurven im Hohlraum einen Lösungsweg zu eröffnen, indem ein Punkt gesucht wird, der repräsentativ für den Klang der Gitarre steht. Mit dem Einbau eines Mikrofons könnte dieser dann eingefangen werden. Grundlage für die Suche nach diesem Punkt bildet dabei eine Untersuchung von Collin Gough zur Charakterisierung der Instrumentenfamilie der Geige durch Messungen im Hohlraum. Die Auseinandersetzung mit dem Klang einer akustischen Gitarre umspannt dabei ein großes Themengebiet von der musikalischen Akustik bis zur mathematischen Analyse von Systemen. Diese Arbeit bietet hierzu eine Einführung in diesen Themenkomplex. Der Messversuch und dessen Ergebnisse schließen diese Arbeit ab und geben einen Ausblick für weitere Untersuchungen.

## 2 Akustik der Gitarre

In diesem Kapitel sollen zunächst die Grundlagen zur musikalischen Akustik und Klangentstehung bei der akustischen Gitarre erläutert werden. Diese Basis ist notwendig um später den Klang analysieren und Rückschlüsse ziehen zu können. Orientiert wird sich hierbei an dem Buch von J. Meyer *Akustik der Gitarre in Einzeldarstellung* (s. Literaturverzeichnis). Dazu sollen grundlegende Aspekte zum Klang der Gitarre beschrieben werden die durch ihre Form, das Material und ihre Konstruktion bedingt sind. Die Möglichkeiten des Gitarristen, den Klang durch seine Spieltechnik zu beeinflussen, sollen dabei unberücksichtigt bleiben. Zunächst soll auch noch kurz auf den Klangerzeuger, die Saite, eingegangen werden.

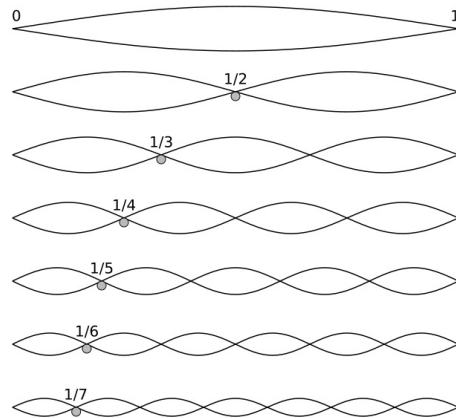
### 2.1 Die Saite

Die akustische Gitarre ist in die Instrumentengruppe der Saiteninstrumente einzuordnen. Der Körper der Gitarre dient dabei nur zur Verstärkung der Saite. Die Saite selbst kann durch ihre geringe Abmessung nur sehr wenig Schall abstrahlen und braucht dazu einen Klangkörper. Die Grundfrequenz einer Saite wird durch die Länge, die Zugspannung und das Gewicht definiert. Dabei ist auf ein ausgewogenes Verhältnis der einzelnen Faktoren zu achten. Mores führt dazu im Buch *Akustische Grundlagen der Musik* einige Beispiele auf. Um die Grundfrequenz einer Saite z.B. zu erhöhen „darf die Zugfestigkeit des Saitenmaterials nicht überschritten werden und ein Instrument muss einer vorhanden Gesamtspannung dauerhaft standhalten.“ (Mores 2014: 323). Durch die Einspannung der Saite entstehen zwei Enden, zwischen denen die Schwingung läuft. Unabhängig von der Erregungsart entsteht durch die Überlagerung zweier gegenläufiger Wellen dann eine stehende Welle auf der Saite. Neben der Grundschwingung bilden sich Oberschwingungen auf der Saite aus. Die Oberschwingungen sind dabei ein vielfaches der Grundschwingung (s. Abbildung 2.1).

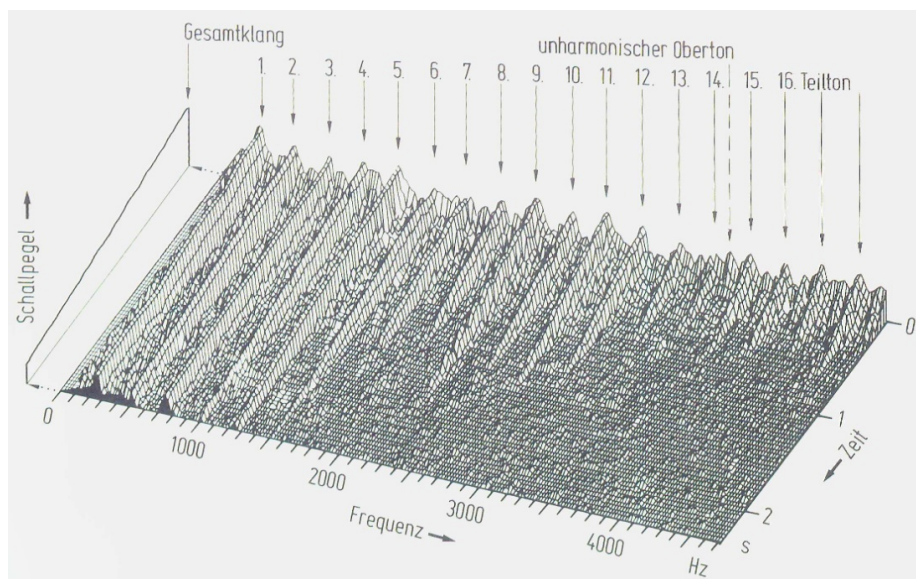
### 2.2 Der Klang der Gitarre

Wie bei tonalen Klängen üblich, setzt sich der Gitarrenton aus einem komplexen Frequenzspektrum zusammen. Die Abbildung 2.2 zerlegt den Ton in Frequenz, Schallpegel und Zeit. Gespielt wurde der Ton h. Zu sehen ist aber neben dem Grundton h bei ungefähr 250Hz, auch eine Vielzahl von sogenannten Obertönen. Die Zusammensetzung (Lage und Amplitude) dieser Obertöne ist dabei ein maßgeblicher Bestandteil des Klanges und dessen Charakterisierung.

## 2 Akustik der Gitarre



**Abbildung 2.1:** Eigenschwingung, Grundschwingung und Obertöne einer Saite



**Abbildung 2.2:** Zeitlicher Verlauf des Klangspektrums eines Gitarrentones

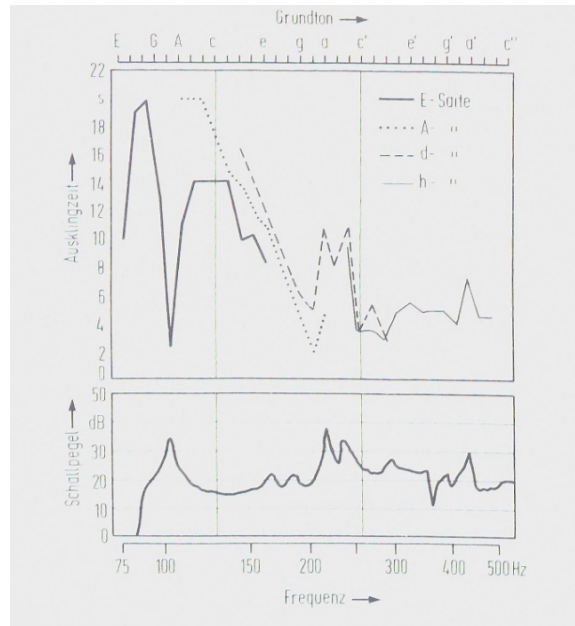
## 2 Akustik der Gitarre

Neben den harmonischen Teiltönen klingen im Einschwingvorgang auch noch andere Frequenzen mit. So ist zwischen dem 14. und 15. Teilton ein unharmonischer Oberton zu finden, der jedoch sehr schnell abklingt. Aber auch zwischen den anderen Teiltönen sind unregelmäßige Frequenzerhöhungen mit schnellem Abklingverhalten zu finden, welche als Geräusche wahrgenommen werden, die jedoch laut Weinzierl „in ihrer frequenzmäßigen Zusammensetzung [...] für jede Instrumentengruppe ein Charakteristikum dar, das wesentlich zum Erkennen des Instrumententyps beiträgt.“ (Weinzierl 2008: 11). Die Einschwingphase ist bei impulshaft angeregten Instrumenten, wie Saiten- oder Membraninstrumenten, nach Erreichen der maximalen Amplitude vorbei. Das Frequenzspektrum während der Einschwingphase gibt zudem Aufschluss über die gespielte Dynamik. So ist bei einem gespieltem Forte ein größerer Anteil an Geräuschen auszumachen und auch die höheren Obertöne sind präsenter als bei einem Piano. So kann ein Forte unabhängig vom Schalldruck erkannt werden. Die Dauer der Einschwingphase gibt zudem Aufschluss darüber, ob wir einen Ton als hart (kurze Einschwingphase) oder weich (lange Einschwingphase) empfinden. Das Frequenzspektrum in der Einschwingphase entsteht dabei durch die breitbandige Anregung der Saite im Moment des Anzupfens. Die Zeitfunktion lässt sich als rechteckige Hüllkurve annähern, die im Frequenzbereich ein Kontinuum zur Folge hat. Durch die kurze Anregung verklingen diese Frequenzen jedoch schnell und die Grundfrequenz sowie dessen vielfachen der Saite, bzw. des gespielten Gruntones, setzen sich durch die langsam abklingende Schwingung durch. Bei der Gitarre wird nach dem Anschlagen oder Zupfen der Saite keine weitere Energie mehr zugeführt und die Saite befindet sich somit nach dem Einschwingen sofort in der Ausklingphase. Anders als bei Streich- oder Blasinstrumenten wird der Saite nicht kontinuierlich Energie zugeführt. Die Energie der Saite wird über den Steg und die Brücke an den Korpus geleitet, der diese dann wiederum an die ihm umgebende Luft abstrahlt. Dabei ist auch eine Wechselwirkung der Energie zwischen Korpus und Saite zu beobachten. Aber auch das Abklingverhalten eines Instrumentes spielt eine zentrale Rolle. Bei der Gitarre, wie auch bei den meisten anderen Instrumenten, klingen die höheren Frequenzen deutlich schneller ab als die tiefen. Die Klangfarbe ist also vom betrachteten Zeitpunkt abhängig. Für die Ausklingphase sind die Resonanzen des Korpus sowie des Hohlraumes verantwortlich. Die Abbildung 2.3 zeigt im oberen Diagramm die Ausklingzeiten einzelner Töne auf unterschiedlichen Saiten. Parallel dazu sehen wir im unterem Diagramm die Resonanzkurve der Gitarre, die mit einem Impuls am Steg angeregt wurde. Die Hohlraumresonanz, die tiefste Resonanz der Gitarre, bei ca. 105 Hz entzieht der Saite besonders schnell die Energie und führt zu einer sehr kurzen Ausschwingphase. Die anderen Resonanzen, die auf Plattenschwingungen des Korpus und der Decke zurückzuführen sind erhöhen jedoch die Ausklingzeit der einzelnen Töne.

Gleiches gilt hier auch noch einmal umgekehrt für den Einschwingvorgang: ungedämpfte, starke Resonanzen benötigen eine längere Einschwingphase. Die Resonanzen sind zudem auch für die Spielbarkeit eines Instruments verantwortlich. So hält Bader in seinem Buch fest:



## 2 Akustik der Gitarre



**Abbildung 2.3:** Zuordnung der Ausklingzeiten der Grundtöne auf unterschiedlichen Saiten zur Resonanzkurve des Gitarrenkorpus

„Therefore one important criterion for guitar quality, as for all instruments with a resonating body, is that the resonating behavior should be as smooth as possible, i.e. the amplification should be as even as possible over all the tones without so-called "dead spots".“ (Bader 2005: 43).

Die Lage und Stärke der Resonanzen ergeben das sogenannte Timbre oder die Klangfarbe des Instruments. Ein Instrument das über alle Noten gleich verstärkt klingt langweilig, wohingegen es einfacher zu spielen und kontrollieren ist.

### 2.3 Die Grundabstimmung

Wie im letzten Kapitel deutlich wurde, tragen die einzelnen Resonanzen der Gitarre maßgeblich zum Klang bei. So lässt sich zum Beispiel die Qualität eines Instrumentes an der Lage und Anzahl der herausgearbeiteten Resonanzen bestimmen. Im tiefen Frequenzbereich sind zwei Resonanzen ganz maßgeblich an dem Klang der Gitarre beteiligt. Dies ist zum einem die Helmholtzresonanz, die durch das eingeschlossenen Luftvolumen im Korpus entsteht (s.2.5.3) und die erstes Deckenresonanz (s. Kapitel 2.5.1). Bei Gitarren wird, laut Bader (s. *Computational Mechanics of the Classical Guitar*, S.42), zwischen zwei grundsätzlichen Arten unterschieden: der A-Gitarre und der E-Gitarre. Das A und E stehen hier als Noten für die Frequenz der Grundresonanzen. Dabei ist die A-Gitarre jedoch deutlich populärer. Die Gitarre wird beim Bau so abgestimmt, das die ersten drei Resonanzen leicht unter denen der Note A

liegen. Im Idealfall sollten diese Resonanz sogar zwischen zwei Halbtonschritten (in diesem Fall zwischen G<sub>is</sub> und A) liegen, um eine Überhöhung der Amplitude von einzelnen Tönen zu vermeiden. Als Beispiel würden somit die Grundresonanzen bei einer A-Gitarre leicht unter der offenen A-Saite (110Hz), dem a (220Hz) und dem a<sup>1</sup> (440Hz) liegen. Die zwei tiefsten Resonanzen werden bei Meyer als Koppelfrequenzen zweier Schwingungssysteme identifiziert. Der Hohlraum und die Deckenplatte bilden einen gekoppelten Schwingungskreis mit einem Kopplungsfaktor von ca. 0,5. Meyer untersucht hierzu zunächst die beiden System getrennt von einander. Bei der Verbindung einer schwingungsfähigen Decke mit dem Hohlraum verschieben sich dann die Hohlraumfrequenz und die Frequenz der ersten Deckenplattenschwingung. Durch das Mitschwingen der Decke wird die Nachgiebigkeit des Luftvolumens vergrößert, was eine Absenkung der Hohlraumresonanz zur Folge hat. Die Steifigkeit der Decke wiederum wird durch das eingeschlossene Luftpolster erhöht und führt zur Erhöhung der Plattenresonanz. Betrachtet man nun noch das Zusammenspiel von Bodenplatte und Decken-Hohlraumsystem, so entsteht wieder ein System mit zwei Koppelfrequenzen. Dabei führt ein tiefabgestimmter Boden zu einer Verschiebung der beiden Grundresonanzen zu tieferen Frequenzen und dem auftreten einer weiteren Resonanz oberhalb der zweiten Grundresonanz, die durch das Koppeln zweier schwingungsfähiger Systeme entsteht. Ein hochabgestimmter Boden hingegen verliert immer mehr an Bedeutung. Ist der Boden sogar höher abgestimmt als die zweite Grundresonanz, verschwindet die höhere der beiden Koppelresonanzen in einem glatten Verlauf der Resonanzkurve.

## 2.4 Mittelfrequenzen

Für die Abstrahlung der mittleren Frequenzen ist die Decke maßgeblich verantwortlich, deren Eigenschaften in diesem Frequenzbereich durch die Versteifungsanordnungen und das Deckenmaterial bestimmt sind. Dabei kann der Pegel schon durch die Wahl der ersten Deckenresonanz verändert werden, den eine höher abgestimmte Grundresonanz führt zu mehr Schallabstrahlung im mittleren Frequenzbereich. Besondere Aufmerksamkeit wird dem Frequenzband um 1000 Hz gewidmet, der die Vokalfarbe "a" repräsentiert. Laut Meyer ist z.B. „*die Bedeutung dieser Frequenzanteile für eine kräftige Klangwirkung [...] von Streich- und Blasinstrumenten hinlänglich bekannt*“ (Meyer 1985: 37). So werden diesem Frequenzbereich auch Attribute wie Helligkeit und Brillianz zugeordnet, die gerade für Melodielinien wichtig sind. Die Abbildung 2.4 zeigt für die Resonanzspitzen im Frequenzband um 1000Hz die Schwingungsbilder. Zwischen diesen Frequenzen sind die Amplitudenunterschiede und Knotenlinien weniger deutlich und feingliedriger. Die Folge ist eine geringere Abstrahlung des Schalls durch destruktive Interferenzen der gegenphasigen Flächen.



**Abbildung 2.4:** Schwingungsbilder bei den Resonanzfrequenzen der Decke. Die Graustufen entsprechen jeweils 4dB. Flächen mit gleichem Vorzeichen schwingen gleichphasig, der Stern deutet eine Phasenverschiebung von 90 Grad an, untere Abbildung mit Steg.

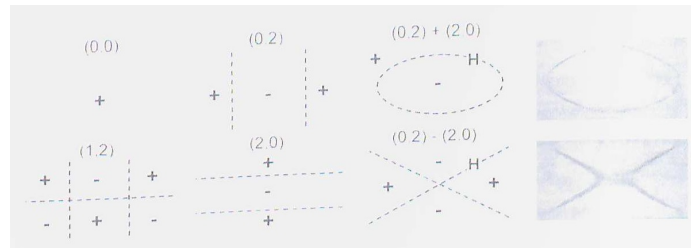
## 2.5 Konstruktion der Gitarre

In diesem Kapitel soll ein Fokus auf die Konstruktionsprinzipien der Decke, des Stegs und des Hohlraumes gelegt werden. Dabei sollen auch akustische Besonderheiten beleuchtet werden.

### 2.5.1 Decke

Die Gedanken zur Ausbreitung einer Welle auf der Saite können auch auf eine Fläche übertragen werden. Dabei wird als Material für Saiteninstrumenten fast immer auf Holz zurückgegriffen. Holz bietet durch seine Balance zwischen Elastizität und Steifigkeit eine optimale Grundlage. Dabei werden Holzarten wie Fichte, Ahorn und Zeder bevorzugt. Das Holz selbst ist dabei als ein nicht homogenes Material anzusehen. Diese Inhomogenität hat einen Einfluss auf die Form der Gitarre. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle ist in longitudinaler Richtung schneller als in radialer Richtung. Mores berechnet dabei „für die Sitka Fichte ein Verhältnis von etwa 1,9, um in longitudinaler und radialer Richtung stehende Wellen derselben Frequenz zu etablieren.“ (Mores 2014: 341). Dies erklärt die rechteckige Grundform von Gitarren und auch Streichinstrumente wie der Geige. Auf der Resonanzdecke und Boden, breiten sich Wellen in zwei Richtungen aus mit einer Wellenlänge, die neben den Materialeigenschaften von den Abmessung der Platte abhängig sind. Die durch das festhalten an den Rändern entstehenden Grundmoden können in Abbildung 2.5 betrachtet werden.

## 2 Akustik der Gitarre



**Abbildung 2.5:** Schwingungsbilder einer Platte mit der Phasenlage, rechts sind die Kreuz- und Ringmode zu sehen

An den Kombinationsmoden wie der Kreuz- oder Kreismode, nimmt der Instrumentenbauer die Grundabstimmung der Platten vor, die er durch festhalten der Schwingungsknoten und anklopfen der Platte hören kann. Auch in den Platten lässt sich, wie auch schon zwischen dem Hohlraum der Decke und auch zwischen allen anderen schwingenden Teilen der Gitarre zueinander, ein gekoppeltes Schwingungssystem zwischen den Moden in Längs- und Querrichtung beobachten. Außerdem sind dünne und steife Decke erstrebenswert, die leicht durch die Saiten erregt werden können (abhängig von der Dicke) und viel Schall abstrahlen (abhängig von der Steifigkeit). Die Decke der Gitarre wird zudem mit Querbalken und Spreizen versteift. Die Querbalken haben im Vergleich zu den Spreizen einen größeren Einfluss auf die Schwingungsform bzw. die Amplitudenverteilung der schwingenden Platte. So wird durch das einziehen von zwei Querbalken ober- und unterhalb des Schallochs der Bereich der frei schwingenden Platte verkleinert. Die Spreizen sowie die Maße und Lage des Stegs machen eine Feinabstimmung der Resonanzen möglich. Gerade im mittleren Frequenzbereich um 1000Hz kann der Schalldruckpegel noch verstärkt werden. Neben der Anzahl der Spreizen (mindestens drei) spielt auch ihre Lage eine entscheidende Rolle. Neben den Möglichkeiten zur Klangveränderung tragen die Querbalken und Spreizen zur Stabilisierung des Instruments bei. Die Decke ist nämlich durch die Spannung der Saite einer Dauerbelastung ausgesetzt und auch das Schalloch verringert die Stabilität.

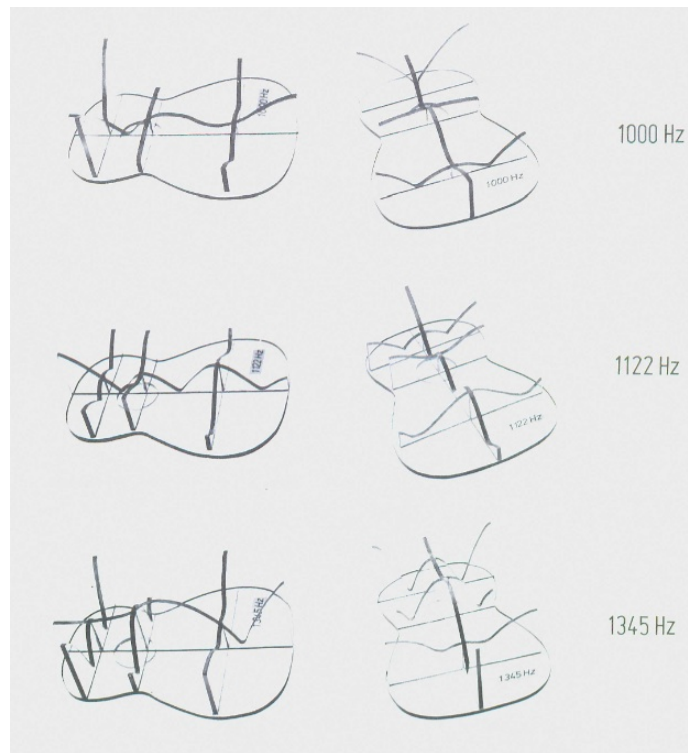
### 2.5.2 Steg

Der Steg, welcher ein bewegliches Ende für die Saitenschwingung ist, koppelt die Saiten an die Gitarrendecke. Das messtechnische Erfassen der frequenzabhängigen Admitanz gibt Aufschluss über die Schwingungsfähigkeit des Stegs. Die Saite regt den Steg durch sechs Freiheitsgrade an (drei Raumrichtungen und drei Rotationsbewegungen). Dabei nutzt die Gitarre laut Mores „vor allem die Auslenkung in vertikaler Richtung sowie Kippbewegungen [...]“. (Mores 2014: 349). Wie schon im Kapitel 2.5.1 angedeutet, hat die Masse und Lage des Stegs Einfluss auf die Deckenresonanzen. Eine Position des Stegs in der Mitte bevorzugt z.B. eher tiefe Resonanzen wohingegen eine Lage am Zargenrand hohe Resonanzen besser anregt. In Abbildung 2.4 ist zudem der Einfluss der Stegposition auf vorhandene Deckenresonanzen zu sehen. Der Steg lässt

sich in der Systemtheorie als Eingang des Systems beschreiben. Der Frequenzgang einer Gitarre kann also durch das Anschlagen des Stegs mit einem Impulshammer ermittelt werden.

### 2.5.3 Hohlraum

Der Hohlraum der Gitarre lässt sich nur bedingt an einem Helmholtzresonator annähern. Die Voraussetzung für solch einen Resonator ist, dass das eingeschlossene Luftvolumen, wie bei einer Druckkammer, überall den gleichen Schalldruck aufweist. Durch die rechteckige, flache Form, die aus der Mitte verschobene Position des Schalllochs und durch die unsymmetrische Form, verschiebt sich der mit der Formel berechnete Wert für die Resonanz nach unten. Auch die Rundungen der Zarge führen zu einer tieferen Frequenz. Zusätzlich zu dieser Hohlraumresonanz entstehen im Körper zwischen den Zargen diverse Moden, die durch das relativ große Schallloch auch nach außen hin abgestrahlt werden können. Moden entstehen sowohl in Längs- als auch Querrichtung und lassen sich annähernd einfach durch die Abmessung des Instruments berechnen.



**Abbildung 2.6:** Schallverteilung von Hohlraumresonanzen

Der berechnete Wert liegt dabei etwas über den Abmessungen. Meyer stellt z.B. dazu in einer Vermessung bzw. Abtastung des Hohlraumes mit einem Sondenmikrofon eine Mode in Längsrichtung von 733 Hz fest, welches einer Wellenlänge von

47cm entspricht. Die Abmessungen der Gitarre waren dabei 49,5 cm. Abbildung 2.6 zeigt exemplarisch für drei Frequenzen die Ausbreitung von stehenden Wellen im Hohlraum. Die stehenden Wellen können nach Meyer durch die Deckenschwingungen angeregt werden:

*„Vorraussetzung dafür ist, daß die Phasenverschiebung auf der Platte und in der anzuregenden stehende Welle hinreichende Ähnlichkeiten aufweist.“ (Meyer 1985: 48).*

Als Beispiel kann hier die Resonanz bei 1350Hz und der Deckenresonanz bei 1360Hz genannt werden (vgl. Abbildung 2.4 und 2.6).

## 2.6 Aktuelle Entwicklungen im Gitarrenbau

Anders als z.B. bei der Geige ist der Entwicklungsstand der Gitarre noch nicht an ihrem Ende. Die Geige hat seit gut 200 Jahre ihr klangliches und bauliches Enstadium erreicht (aber auch hier gibt es in letzter Zeit wieder Ansätze für Verbesserungen). Bei der Gitarre wird zur Zeit vor allem an zwei baulichen Eigenschaften experimentiert. Dies ist zum einem die Position der Spreizen an der Decke und zum anderem die Form und Position des Schallochs. Die Anordnung von asymmetrischen Spreizenmustern bergen laut Angela Waltner zwei Vorteile:

*„Akustischen Kurzschlüsse werden verhindert und es entstehen zusätzliche Resonanzen.“ (Waltner 2005: 19).*

Auch beim Schalloch wird mit unsymmetrischen Formen experimentiert, um dem Klang eine individuelle Note zu geben. Für die Form ist folgendes festzuhalten:

*„Hier gilt, alles was Luftreibung erzeugt und flattern kann, ist nachteilig für die Klangübertragung.“ (Stoll Guitars 2015).*

Durch die seitliche Positionierung des Schallochs können z.B. Versteifungen der Decke eingespart werden, da sich die Statik der Gitarre verbessert. Auswirkung hat dies auch auf die Schwingungsformen der Decke. Schalllöcher in der Zarge sollen dem Gitarristen als Monitor dienen. Beide Entwicklung spielen eine große Rolle für eine mögliche Position des Mikrofons im Hohlraum, da sie die Schallverteilung im Hohlraum aber auch Resonanz und deren Verteilung auf der Decke verändern. Durch die Verschiebung des Schallochs in die obere linke Ecke der Decke kann z.B. die freischwingende Fläche unterhalb des Querbalkens vergrößert werden, da dieser mit dem Schalloch verschoben werden kann.

# 3 Verstärkungsmöglichkeiten bei der akustischen Gitarre

In diesem Kapitel sollen die aktuellen Möglichkeiten der Verstärkung bei der Beschallung aufgezählt und später näher erklärt werden. Vor allem soll dabei auf die Schwachpunkte sowie den Klang eingegangen werden, um daraus Schlüsse für die Optimierung ziehen zu können. Dabei soll die Natürlichkeit des Klangs im Vordergrund stehen. Auf dem Markt haben sich zur Zeit für die Live-Beschallung mit akustischen Gitarren magnetische sowie piezoelektrische Tonabnehmer durchgesetzt. Daneben existieren natürlich auch aus dem Studiobetrieb bekannte Mikrofonierungsmöglichkeiten, sowie sogenannte Instrumentenmikrofone, die am Schalloch angeklemt werden.

## 3.1 Mikrofonierung

### 3.1.1 Mikrofonierung vor dem Instrument

Für die Mikrofonierung von Gitarren auf der Bühne wird sich an typischen Studio-mikrofonierungen orientiert. Als Mikrofontyp werden Kleinmembran Kondensatormikrofone bevorzugt, die durch ihre kleinere Kapsel eine höhere Impulstreue haben und so die Transienten der Gitarre besser wiedergeben. Dies führt zu einem klaren und brillanten Klang. Aber auch Großmembran Kondensatormikrofone finden ihren Einsatz im Studio und auf der Bühne, um z.B. einen wärmeren Klang zu erzeugen. Um einen ausgewogenen Klang mit nur einem Mikrofon zu erzielen, ist ein Abstand von 50cm-100cm vonnöten (vgl. Dickreiter). Um eine geeignete Position zu finden, empfiehlt sich als Startpunkt für die Suche der Bereich, an dem das Griffbrett auf den Korpus trifft. Eine Verschiebung Richtung Schalloch fügt dem Klang mehr Bässe hinzu, während eine Position am Griffbrett weiter hoch zu einem dünneren Klang führt, dem sich auch mehr Saitengeräusche zumischen. Auch kann eine Position in dem Bereich zwischen Schalloch und Steg zu einem ausgewogenem Klang führen. Außerdem werden kleine Mikrofone mithilfe einer Klammer und eines kurzen Schwanenhals an das Schalloch angebracht. Problematisch wird der Mikrofoneinsatz bei lauten Umgebungen, da durch das hohe Übersprechen und Monitoring das Rückkopplungsrisiko sehr hoch ist. Daher ist die Mikrofonabnahme vor allem bei Singer-Songwriter und Solisten zu sehen. Das zu hörende Ergebnis kommt dem Klang einer unverstärkten Gitarre am nächsten.

### 3.1.2 Mikrofonierung im Resonanzkörper

Die Idee dieser Arbeit, ein Mikrofon im Hohlraum des Instrument zu verbauen, wurde auch schon von anderen Firmen umgesetzt. Als Beispiel soll hier die Entwicklung von L. R. Baggs näher erklärt werden.



**Abbildung 3.1:** L.R. Baggs *Lyric* auf der Unterseite eines Stegs

Wie auf dem Bild zu sehen, wird das Mikrofon direkt an der Unterseite der Brücke mit einem Klebestreifen fixiert. Die Kapsel befindet sich 3mm unter der Resonanzdecke. Ein zweites kleines Gehäuse beherbergt den Preamp mit einem Volumeregler und einem Schalter zur Präsenzhebung. Dieser kann am Schalloch festgeklebt werden. Ein speziell abgestimmter Mic-Preamp soll Rückkopplungen unterdrücken und den natürlichen Klang der Gitarre durch eine extra entwickelte Frequenzkurve unterstützen. Das Mikrofon ist in zwei Varianten verfügbar - für Stahlsaiten und für Nylonsaiten. Mikrofone wie dieses sollen neben der zuvor vorgestellten Mikrofonierung die am natürlich klingendste Verstärkungsmöglichkeit sein. Trotz seiner wohl sehr leichten Bauart wird die Masse der Resonanzdecke durch das Ankleben des Mikrofons erhöht. Zudem ist dies Mikrofon ein Druckgradient-Wandler. Da das Mikrofon mit der Resonanzdecke in Phase mitschwingt, kann der Druckunterschied von der Kapsel vermutlich weniger gut wahrgenommen werden und es werden vor allem Reflexionen des Korpus aufgenommen. Zudem ist die Gefahr von Rückkopplungen trotz Filter bei internen Mikrofonen recht hoch.

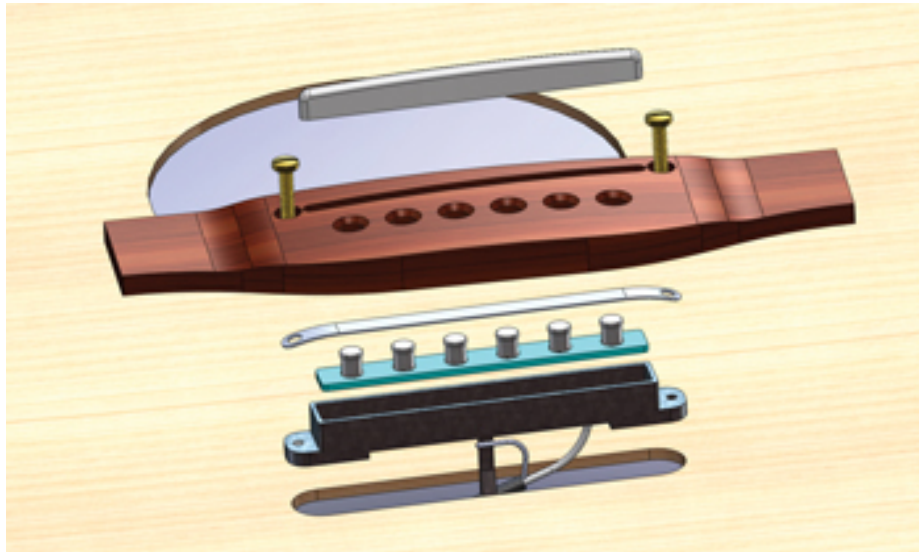


## 3.2 Tonabnehmer

Bei den Tonabnehmer sind zwei Kategorien zu unterscheiden. Dies sind zum einem die magnetischen Tonabnehmer und zum anderem die piezoelektrischen Tonabnehmer. Die magnetischen Tonabnehmer funktionieren im Prinzip wie bei einer elektrischen Gitarre. Der Tonabnehmer wird mit Hilfe einer Aufhängung unter den Saiten zwischen dem Schallloch eingehängt. Durch die Schwingung der Saite wird in dem Wandler, bestehend aus sechs Magneten die mit einer Spule umwickelt sind, eine elektrische Spannung induziert, die dann durch einen Preamp verstärkt an die PA weitergeben wird. Der Preamp ermöglicht eine Anpassung des Klangs mithilfe eines Equalizers, Effekten und einem Volumenregler. Pickups dieser Art, wie das Takamine Tri-Ax 2, können durch eine zweite eingebaute Spule sogar die Vibration der Decke aufnehmen. Die zweite Spule wird dazu unter der ersten platziert (anders wie beim Humbucker, wo die zweite Spule neben der Ersten platziert wird), und zwar so, dass diese sich in alle drei Dimensionen bewegen kann. Durch das Schwingen der oberen Spule durch die Decke wird in der unteren Spule auch eine Spannung induziert. Dieser Tonabnehmer funktioniert allerdings nur mit Stahlsaiten, da der elektromagnetische Wandler sonst nicht anspricht. Man sagt diesem Tonabnehmer allerdings einen Klang nach, der eher an eine elektrische Gitarre als an eine akustische erinnert. Der Einbau eines solchen Tonabnehmers ist sehr einfach und für den schnellen Einsatz konzipiert, ohne einen handwerklichen Eingriff an der Gitarre vornehmen zu müssen. Auch das Kabel kann einfach direkt an dem Pickup gesteckt werden und hängt aus dem Schallloch raus. Zum Einsatz mit mehreren Pickup-Systemen werden oft auch noch Phasenumkehr-Schalter eingebaut um eventuelle Auslöschungen zu vermeiden. Der magnetische Pickup, aber auch der Piezotonabnehmer wird zudem oft in Kombination mit Effektgeräten und/oder extra Akustikgitarren-Verstärkern gespielt. Oft erinnert der Klang dadurch noch mehr einer elektrischen Gitarren, wenn z.B. Effekte wie Chorus und Phaser benutzt werden.

Häufiger wird jedoch in Gitarren ein Piezoabnehmer verbaut. Takamine hat auch hier im Jahr 1979 mit dem PT-007S (s. Abbildung 3.2.) die Maßstäbe gesetzt. Wird auf piezoelektrische Kristalle, wie z.B. Quarz, Kraft ausgeübt, wird durch die Veränderung der elektrischen Polarisierung im Kristall eine elektrische Spannung frei. Bei Gitarren wird diese Kraft durch die Saiten erzeugt, die auf die Kristalle drücken. Dazu wird der Tonabnehmer unter dem Steg angebracht (sog. Untersteg-Tonabnehmer). Die Saiten drücken auf den Steg und dieser gibt die Kraft weiter an den Tonabnehmer. Auch hier werden wieder für jede Saite ein eigener Piezo verbaut. Der Klang des Korpus mit seinen Schwingungen wird jedoch weniger durch den Pickup aufgenommen. Untersteg-Tonabnehmer haben mitunter deswegen den Ruf, einen sehr hohlen, dünnen und artifiziellen Klang zu erzeugen.

Sowohl bei dem magnetischen als auch piezoelektrischen Tonabnehmer lassen sich die sechs Magneten bzw. Piezos in ihrer Höhe zur Saite mit Hilfe eines Schraubenziehers verstellen. Dadurch kann der Gitarrist z.B. durch das Anheben der Wandler bei den tiefen Saiten die Bässe der Gitarre mehr verstärken oder generell für ein aus-



**Abbildung 3.2:** Piezotonabnehmer Takamine PT-007S

gewogeneres Klangbild sorgen. Zusätzlich zum Pickup im Steg kann noch ein weiteres Kontaktmikrofon, das sich auch den piezoelektrischen Effekt zu Nutzen macht, auf der Deckenober- oder Deckenunterseite angeklebt werden. Die Schwingung der Resonanzdecke führt auch hier zur Verformung des Piezos und somit zur Freisetzung einer Spannung. Die Kombination beider Pickups führt zu einem natürlicheren Klangbild, das auch unanfällig gegenüber Rückkopplungen ist. Die hohe Rückkopplungssicherheit des Unterstegs-Tonabnehmers wird sich auch bei der Kombination eines solchen Pickups mit einem internem Mikrofon zu Nutzen gemacht. Die beiden Signale lassen sich an einem eingebauten Mischer in der Gitarre mischen, um für jede Bühne ein optimales Ergebnis zwischen natürlichem Klang und hoher Rückkopplungssicherheit zu ermöglichen. Kontaktmikrofone, wie z.B. das von Schertler produzierte DYN G, können nicht nur an der Decke, sondern auch an der Brücke befestigt werden. Die Position ist dabei sehr entscheidend für den Klang. Weit weg von der Brücke wird der Klang sehr warm und natürlich. Um so näher das Kontaktmikrofon zur Brücke wandert, um so direkter und artikulierter wird der Klang. In das Klangbild mischen sich wieder mehr Höhen und der Klang nähert sich dem eines Untersteg-Tonabnehmers. Die Aufnahme des Körperschalls ist auch hier wieder abhängig von der Lage der Deckenresonanzen. Kontaktmikrofone sind Rückkopplungsanfällig. Die Position auf der Brücke ist dabei die unanfälligste. Das Gewicht eines Kontaktmikrofons auf der Decke schränkt dabei die Schwingungen der Decke ein (analog zum eingebautem Mikrofon unter dem Steg).

## 4 Untersuchungen von C. Gough zur Violine

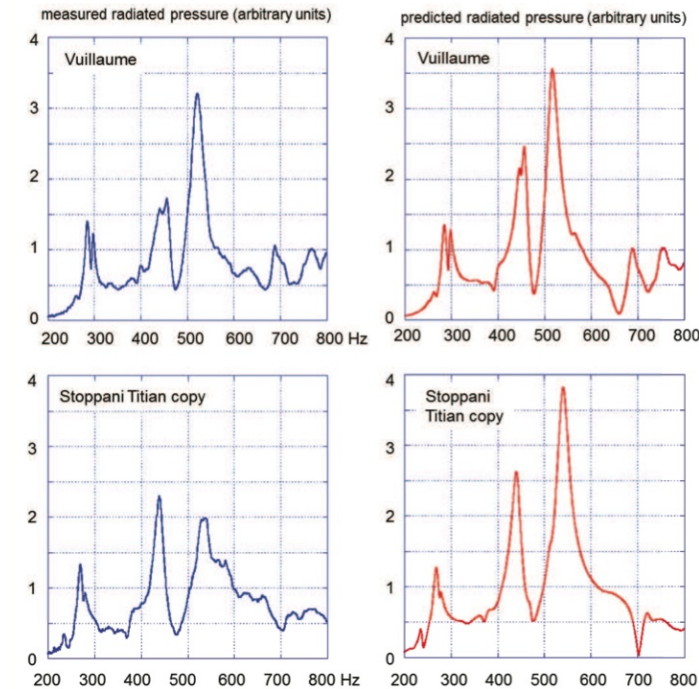
Colin Gough hat in seiner Untersuchung "Acoustic Characterization of violin family Signature modes by internal cavity Measurements", die er im Jahr 2013 auf der Stockholm Music Acoustics Conference vorgestellt hat, für die zwei unteren Oktaven der Violinenfamilie folgendes festgestellt:

*„Measurements of the sound pressure at the acoustic centre of the violin and related instruments are shown to characterise the acoustic modes of stringed instruments of any size at low frequencies, free of contamination from room acoustics and external noise.“* (Gough 2013: 6).

Die Beziehung zwischen dem internen sowie nach außen abgestrahlten Schalldruck ist durch die *standard loudspeaker-enclosure theory* beschrieben. Mithilfe dieses Modells überführt Gough zunächst einmal die akustischen und physikalischen Eigenschaften der Geige in einen elektrischen Schaltkreis. Durch die Überführung ist es möglich, eine Prädiktion über den von der Geige abgestrahlten Schalldruck sowie den internen Schalldruck zu berechnen. Die Abbildung 4.1. zeigt die große Ähnlichkeit zwischen dem gemessenem abgestrahltem Schalldruck in 30cm Abstand gegenüber dem berechneten internen Schalldruck am akustischen Zentrum der Geige.

Die A0 sowie CBR Moden werden sehr genau in der Berechnung wiedergeben. Für die Unterschiede in der Amplitude der B1- und B1+ Mode müssen laut Gough noch weitere Untersuchungen unternommen werden. Aus diesen Ähnlichkeiten schließt Gough, dass die Messung des internen Schalldrucks und dessen Spektrum eine brauchbare Alternative zur üblichen Messmethode ist. Die gängige Praxis zur Messung von Impulsantworten bei Instrumenten liegt in der Verwendung eines Impulshammers. Das Instrument wird dazu in einem reflexionsamen Raum, um mögliche Raummoden und Reflexionen aus der Messung ausschließen zu können (dies gilt vor allem für die tiefen Frequenzen), ungedämpft aufgehängt. Ein Messmikrofon wird mit einigem Abstand zum Instrument positioniert. Grundsätzlich sollte bei der Entfernung beachtet werden, nicht im Nahfeld der Schallquelle zu sein. Bei Instrumenten mit tiefen Tönen kann dies schon problematisch werden, vor allem wenn die raumakustischen Gegebenheiten nicht optimal sind. Die Impulsantwort kann dann durch das kurze, scharfe Anklopfen des Impulshammers am Steg des Instruments gemessen werden. Dazu werden die Saiten in den meisten Messungen gedämpft. Das Mitschwingen der Saiten würde sonst nur zu einem komplexeren Spektrum führen, das für die Beurteilung des Instruments irrelevant ist. Trotzdem sollte das Instrument mit Saiten

#### 4 Untersuchungen von C. Gough zur Violine



**Abbildung 4.1:** Gemessener und berechneter Schalldruck zweier Geigen

bespannt sein, um die Spannung, die durch das Ziehen der Saite entstehen, auf der Decke und dem Rest des Körpers zu berücksichtigen. Goughs neuer Ansatz ist, ein Miniaturmikrofon an einem gewölbten, gefederten Holz- oder Plastikträger unter dem akustischem Zentrum, welcher sich laut Gough beim Steg befindet, an den beiden F-Löchern zu befestigt. Das akustische Zentrum ist für die Platzierung des Stegs auf der Decke der Violine wichtig und lässt sich laut Christian Adam wie folgt finden:

*„Er (der Steg) wird in einer gedachten Linie zwischen die F-Kerben gestellt. Der Abstand der Füße zum F-Loch sollte auf beiden Seiten gleich sein.“ (Adam 2013).*

Die Vorteile liegen zunächst bei der Erhöhung des Signalrauschabstands und der Vermeidung von Einflüssen der Raumakustik. So können Messungen auch unter schwierigen Bedingungen aufgenommen werden. Die Messungen weisen ein Spektrum auf, die eine Charakterisierung des Instruments möglich machen. Gerade für Instrumente mit einem großem Anteil an tiefen Frequenzen, erweist sich diese Messung als äußerst praktikabel. In dem Abstract werden dazu Messungen an Kontrabässen und einer Bratsche präsentiert. Klar zu erkennen sind dort die Grundresonanzen A0, B1-, B1+ (bei den Kontrabässen sind es zwei nicht näher beschriebene Resonanzen), sowie ein Spektrum an mehreren Resonanzen im mittlerem Frequenzbereich. Leider werden keine Vergleichsmessungen mit der herkömmlichen Methode zur Messung der Impulsantwort bei dem selben Instrumenten diesen Ergebnissen gegenübergestellt. So bleibt ein direkter Vergleich der Methoden noch ungeklärt.

# 5 Analyse von Musikinstrumenten

Im letztem Kapitel wurde die Herangehensweise und Ergebnisse von C. Coughs Messungen von internen Schalldrücken und Resonanzkurven einer Geige beleuchtet. In diesem Kapitel sollen nun die analytischen Werkzeuge zur Beschreibung von Musikinstrumenten dargelegt werden.

## 5.1 Mathematische Auswertung der Messungen

Schon im ersten Kapitel wurde deutlich, dass zur Charakterisierung und Analyse von Instrumenten ihre Resonanzkurven und Übertragungsfunktionen nötig sind. Der Klang der Gitarre kann dazu im Zeitbereich und im Frequenzbereich betrachtet werden. Im Zeitbereich kann bei Instrumenten der Schalldruck über die Zeit betrachtet werden, wohingegen das Spektrum Aufschluss über die Anteile sinusförmiger Komponenten gibt. Die beiden Bereiche lassen sich durch die Fourier-Analyse und Fourier-Synthes ineinander überführen. Für eine effiziente Berechnung wurde ein Algorithmus, die sogenannte Fast-Fourier-Transformation, entwickelt. Die FFT ist eine computeroptimierte Fourier Transformation die nur für gesampelte, periodische Signale gilt. Die Anzahl bzw. das Fenster an Sampels muss eine zweier Potenz sein. Zur Analyse von Musikinstrumenten wird in der Regel eine FFT-Fensterlänge gewählt, die die ganze Dauer des zu analysierenden Zeitsignals umfässt. Bei einer Abtastrate von 48kHz und einer FFT-Größe von 16384 Samples ergibt sich so z.B. ein Zeitfenster von 0,341 Sekunden. In dieser Zeit verklingt die Impulsantwort der meisten Instrumente bzw. geht im Rauschen unter. Das Zeitsignal muss für die FFT mit einem Samplewert bei Null anfangen und auch enden. Curtin erklärt in seiner Arbeit zur Messung von Geigen, dass *„impulse measurements begin and end at something very close to zero (depending on noise levels), and so do not require smoothing windows.“* (Curtin 2009: 2). Falls dies nicht der Fall sein sollte, kann durch Fensterfunktion (z.B. Hamming- oder Blackman-Fenster) das Signal angepasst werden. Das Ergebnis der FFT ist zum einen das Betragsspektrum *„für das Gewicht der jeweiligen Sinusfunktion mit der Frequenz  $f$  innerhlab der Zerlegung steht, während die Phase der komplexen Werte, das sog. Phasenspektrum  $\arg(X(f))$ , die zeitliche Lage jeder einzelnen sinusförmigen Komponente relativ zum Zeitpunkt  $t=0$  gibt.“* (Weinzierl 2014: 17). Das Betragsspektrum wird meist ohne das Phasenspektrum gezeigt, da diesen Informationen schwerer zugänglich sind. Um eine anschaulichere Darstellung des Zeitverlaufs zu erhalten, kann das Signal mithilfe der Kurzzeit-Fourier-Transformation analysiert werden. Dazu wird das Signal in kleine Fensterlängen von 512 bis 2048

Abtastwerten unterteilt. Die Daten werden dann wie in der Abbildung 2.1 dreidimensional dargestellt. Das sogenannte Spektrogramm zeigt die zeitlich unterschiedlichen Betragsspektren in diesem Fall durch eine Aufreihung dieser in der z-Achse. Die Übertragungsfunktion hingegen gibt Aufschluss darüber, wie ein System auf ein Eingangssignal reagiert. Weinzierl beschreibt die Übertragungsfunktion wie folgt:

*„Die Übertragungsfunktion beschreibt den Faktor, um den das (komplexwertige) Spektrum eines Eingangssignals durch das System verändert wird, ob etwa hohe Frequenzen im Vergleich zu tiefen Frequenzen überproportional abgeschwächt werden.“* (Weinzierl 2014: 21).

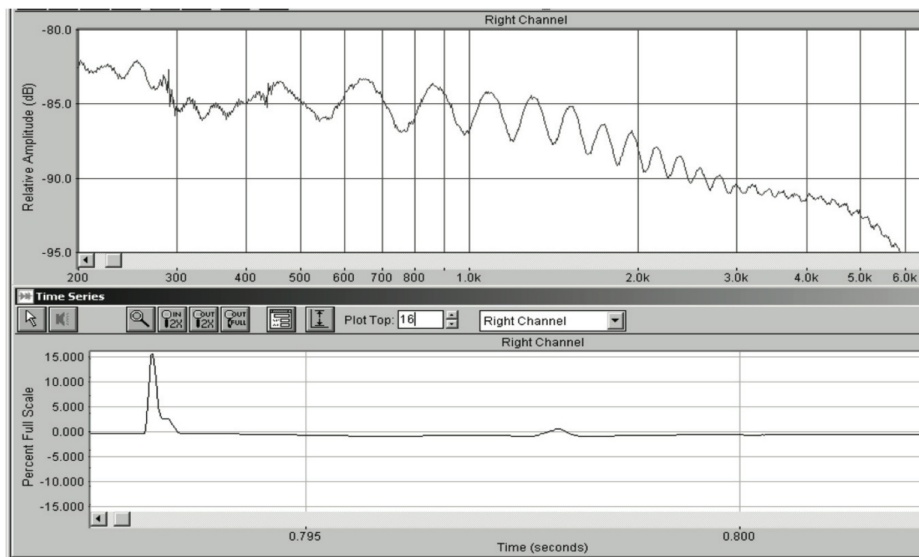
Neben Räumen kann auch der Resonanzkörper der Gitarre mit der Übertragungsfunktion beschrieben werden. Dazu wird das System durch einen Impulshammer, näherungsweise ein idealer Dirac-Stoß, am Steg (Eingang des Systems) angeregt und im Fall der Gitarre, zur Schwingung gebracht. Der Dirac- oder Delta-Stoß enthält durch seine unendlich kurze Dauer bei allen Frequenzen die gleiche Menge an Energie und kann das System somit gleichmäßig anregen. Zur Kontrolle kann sich der Frequenzgang des Schlags angeguckt werden. Durch das weiche Material des Stegs ist ein solcher linearer Frequenzgang jedoch nicht zu erwarten. Der weiche Steg führt zudem zu der Gefahr von Doppelschlägen des Hammers. Ein Doppelschlag des Hammers tritt wie folgt auf:

*„A double bounce occurs when the bridge deflects in response to an impact, but then rebounds toward the retreating hammer and catches up with it, causing a second collision.“* (Curtin 2009: 13).

Dieser ist meist nicht zu hören und muss bei der Aufzeichnung im Zeitsignal kontrolliert werden. Die Abbildung 5.1 zeigt die Folgen eines Doppelschlages für die Übertragungsfunktion des zu testenden Systems: Wir finden den zweiten Schlag als Schwingung in der Übertragungsfunktion wieder, abhängig von der Zeit zwischen den Schlägen und der Amplitude des zweiten Schlages. In diesem Beispiel liegt der zweite Schlag 0,005 Sekunden hinter dem ersten. Die daraus resultierende Frequenz von 200Hz können wir als periodische Schwingung im oberem Graphen sehen (450Hz-650Hz-850Hz usw.). Der Impulsschlag des Hammers wird bei der Messung mit aufgezeichnet um eine komplexe Übertragungsfunktion berechnen zu können. Dazu wird das komplexe Spektrum des Mikrofons mit dem komplexen Spektrum des Hammers dividiert. Impulsschläge unterschiedlicher Stärke und spektralem Inhalt führen so zu ähnlichen Ergebnis.

Der Ausgang des Systems, in dem Fall die Abstrahlung des Schalls durch den Korpus, werden in Kapitel 6.2.1 noch näher erklärt. Als Programm zur Analyse wurde auf SpectraPLUS-SC zurückgegriffen. Für einen schnellen Überblick während der Messung konnten die in Cubase implementierten Analysetools genutzt werden.

## 5 Analyse von Musikinstrumenten



**Abbildung 5.1:** Oben: Übertragungsfunktion eines Systems; Unten: Zeitsignal des Hammers

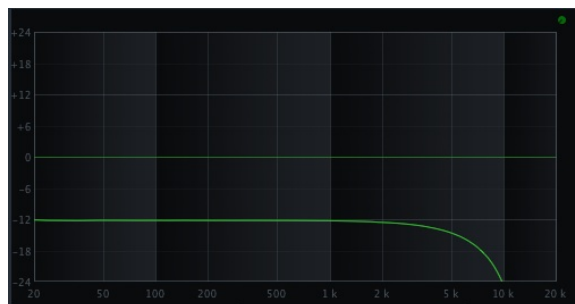
# 6 Messaufbau und Messdaten

## 6.1 Hohlraum

Messungen im Resonanzkörper von Instrumenten werden von Wissenschaftlern z.B. zur Ermittlung von Moden durchgeführt (s. Kapitel 2.5.2). Dazu werden Modell gebaut, die ähnlich einer Gitarre sind, aber in welchem einfacher, z.B. durch Löcher in der Zarge, Messmikrofone eingeführt werden können. Zudem ist es möglich, einzelne Teile durch das Einbetten in Sand zum nicht-schwingen zu bringen um Zusammenhänge zwischen einzelnen Komponenten zu erforschen. Die Erhebung von Frequenzspektren und Übertragungsfunktionen wird normalerweise nicht im Hohlraum von Instrumenten durchgeführt (s. Kapitel 4). Hingewiesen sei hier schon einmal auf einige Probleme. Durch die Reflexionen im Hohlraum ist mit Kammfiltereffekten zu rechnen und die Gefahr der Erhöhung einzelner Frequenzen durch Messpunkte an Schwingungsbäuchen und umgekehrt bei Knotenpunkten von stehende Wellen zu beachten. Für diese Messung wurde, anstatt auf ein Modell, auf eine Westerngitarre der Marke Yamaha zurückgegriffen. Die Gitarre ist im mittlerem Preissegment angesiedelt. Daher ist keine allzu gute Ausarbeitung der Resonanzen zu erwarten.

### 6.1.1 Messversuch im Hohlraum

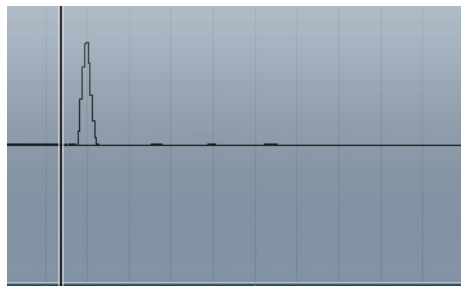
Meinen Messaufbau habe ich im Produktionslabor der HAW Hamburg aufgebaut. Als Instrument stand mir eine Yamaha Westerngitarre mit einem eingebauten Untersteg-Tonabnehmer zur Verfügung. Als Impulshammer wurde ein Kistler vom Typ 8614A500M1 verwendet mit dem passendem Verstärker von Kistler 5134. Der Frequenzgang des Hammers ist bis ca. 3kHz linear und sinkt dann bis 10kHz ab. Der Frequenzgang



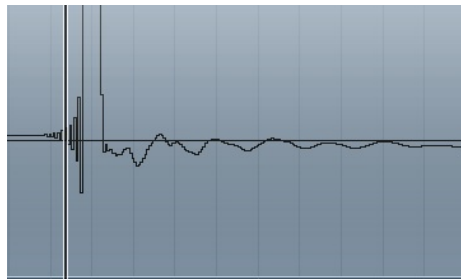
**Abbildung 6.1:** gemessener Frequenzgang des Impulshammers Kistler 8614A500M1



wurde aus einem Schlag an dem Steg der Gitarre analysiert. Der Abfall der Kurve bei hohen Frequenzen ist durch die Dämpfung des verbauten Materials am Steg zu erklären. Daraus abzuleiten ist, dass über einer Frequenz von 3kHz die Gitarre nicht mehr gleichmäßig mit Energie angeregt wird. Der Frequenzbereich von 20Hz-3kHz soll aber für diese Arbeit ausreichend sein. Der höchste Ton bzw. Note einer Gitarre bei z.B. 24 Bünden ist das  $e''$  mit einer Frequenz von ca. 1320Hz, und liegt somit noch unter den 3kHz. Auch das wichtige mittlere Frequenzband um 1000Hz kann berücksichtigt werden. Zur Vermeidung von Doppelschlägen des Hammers am Steg, wurde die Gitarre Überkopf aufgehängt, um die Erdanziehungskraft auszunutzen. Das Kabel zum Verstärker wurde mit als Feder für das zurückschwingen genutzt. In der Abbildung 4.4 ist der Impuls gut ohne einen Doppelschlag zu erkennen. Bei maximaler Vergrößerung der y-Achse Auflösung in der Software sind die kleinen Erhöhung in der Abbildung 6.2 als Schwingungen des Hammers zu erkennen (s. Abb. 6.3).



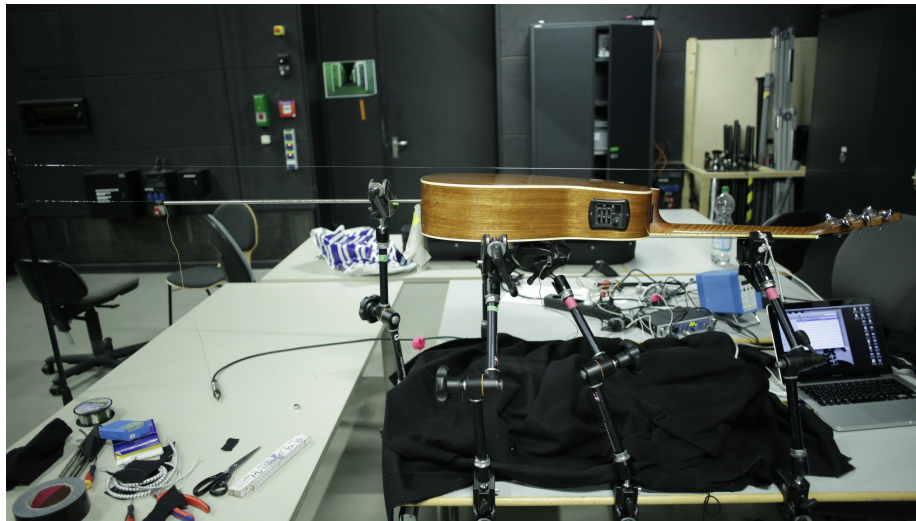
**Abbildung 6.2:** Zeitsignal des Impulshammers



**Abbildung 6.3:** Zeitsignal des Impulshammers bei maximaler Auflösung der Amplitude

Als Interface diente mir ein RME Fireface 400 das an ein einfaches MacBook Pro angeschlossen wurde. Als Messmikrofone wurde ein Sennheiser MKE2 (s. Datenblatt im Anhang A.1) verwendet, das eigentlich aus dem Bühnenbereich für Sprachverstärkung bekannt ist. Dabei handelt es sich um dauerpolarisiertes Kondensatormikrofon mit Kugelcharakteristik. Sein linearer Frequenzgang bis 3000hz und die geringen Abmessungen von 4,8mm machen es jedoch zu einem perfektem Messmikrofon für diese Arbeit. Das Mikrofon wurde durch ein Edelstahlrohr geführt und vorne mit Knetgummi fixiert. Für die Messung wurde die Klinkenbuchse der Gitarre abmontiert.

Das Edelstahlrohr konnte so durch das Loch in die Gitarre gebracht werden. Dabei war der Durchmesser des Rohrs geringer als das des Lochs, damit sich beim Kontakt kein Körperschall auf das Rohr überträgt. Um das Rohr ohne eine Verschiebung in x-, y- oder z-Richtung durch die Gitarre schieben zu können, wurde mit zwei Nylon-Seilen eine Art Führungsschiene gebaut. Fixiert wurde die Gitarre mit sogenannten Magic-Armen von Manfrotto und passenden Uni-Klemmen. Der Hals wurde mit einem Gummiband unter den Saiten an einer Uniklemme elastisch aufgehängt. Der Korpus wurde mit zwei weiteren Armen und Klemmen am Rand, wo die Zarge auf die Decke trifft, fixiert. Zwischen die Gitarre und Klemmen wurde zusätzlich Gummi gelegt. Da am Verbundpunkt zwischen Zarge und Decke eine fast feste Versteifung gegeben ist, sollte durch den Aufliegepunkt der Gitarre auf den Uni-Klemmen, die Schwingungen der Gitarre unverändert bleiben. Zur Vermeidung von Reflexionen der Tischplatte wurde dieser wellig mit Molton ausgelegt. Reflexionen des Raumes (Flatterechos) wurden mit vorhanden Molton-Rahmen (1m x 3m) entgegengewirkt. Der Impulshammer wurde auch mit einem Arm ca. 1,5cm unter dem Steg platziert.



**Abbildung 6.4:** Messaufbau; noch ohne die Molton-Rahmen

Es wurden eindimensional Messdaten auf der mittleren horizontalen und vertikalen Achse der Gitarre in einem Abstand von zwei Zentimeter aufgenommen. An jedem Messpunkt wurden drei Werte aufgezeichnet. Daraus resultieren, bei einer Abmessung der Gitarre von 50 cm, 24 Messpunkte mit 72 Messwerten.

## 6.2 Messung des nach außen abgestrahlten Schalls

Um die gewonnen Daten aus dem Hohlraum mit dem nach außen hin abgestrahltem Klang einer Gitarre vergleichen zu können, wird in dieser Arbeit ein geeigneter

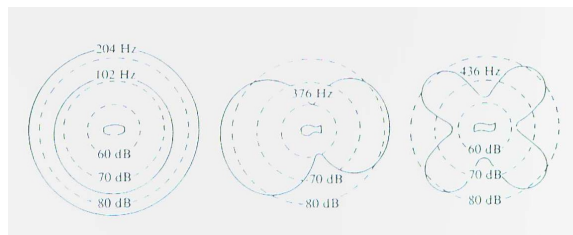
Messaufbau entwickelt. Von Interesse ist hier die Rundumabstrahlung des Instrumentes.

### 6.2.1 Abstrahlverhalten von Gitarren

Interessant für diese Untersuchung ist die Rundumabstrahlung der Gitarre. Dabei ist davon auszugehen, dass ein Großteil des Klangs von der Decke nach vorne hin abgestrahlt wird. Für die tiefen Frequenzen kann von einer kugelförmigen Abstrahlung ausgegangen werden. Doch auch die Zarge und der Boden der Gitarre strahlen durch ihre Schwingung Schall ab. Meyer beschreibt diese Rundumabstrahlung von Instrumenten wie folgt:

„[...] die meisten Instrumente den Schall keineswegs nach allen Seiten in gleicher Intensität abstrahlen, sondern vielmehr eine mehr oder weniger große Richtwirkung besitzen. Diese Abhängigkeit des abgestrahlten Schalldruckes von der Richtung bezeichnet man als Richtcharakteristik.“ (Meyer 2015: 107).

Die Abbildung 6.5 zeigt für vier ausgewählte Frequenzen einer Gitarre diese Richtcharakteristik in Form eines Polardiagramms.



**Abbildung 6.5:** Polardiagramm für die Frequenzen 102Hz und 204Hz, 176Hz und 436 Hz einer Gitarre

Daraus resultierend wird der Klang ein und derselben Gitarre im Freifeld anders als in einem geschlossenem Raum wahrgenommen. Durch die Reflexionen im Raum treffen die nicht zum Hörer abgestrahlten Frequenzen in seinem Ohr ein. Um die Rundumabstrahlung eines Instrumentes erfassen zu können gibt es verschiedene Ansätze. Sie variieren bezüglich der Mikrofonanzahl und Position. So messen z.B. Otondo und Rindel in ihrer Arbeit *The Influence of the Directivity of Musical Instruments in a Room* mit 13 Mikrofonen. Dabei befinden sich acht Mikrofone in einer horizontalen und fünf Mikrofone in einer vertikalen Ebene um das Instrument. Mikrofonarrays, die wie eine Kugel um das Instrument aufgebaut sind (auch Hüllflächenverfahren genannt), benötigen wie bei Pollow, Behler und Vorländer 32 Mikrofone (Anordnung als ein Ikosaederstumpf) oder gar 64 Mikrofone. Messungen dieser Art werden in reflexionsarmen Räumen durchgeführt. Um für diese Arbeit die Resonanzkurve der Rundumabstrahlung zu erhalten, ist ein solcher technischer Aufwand nicht möglich. Eine Annäherung kann aber mit einer Messung im Hallraum erreicht werden.

Beim Hallraum handelt es sich um eine Annäherung des diffusen Schallfeldes durch schallharte Wände, eine schiefwinklige Geometrie und geeignete Diffusoren. So ist der gemessene Schalldruck in einem Hallraum an jedem Ort identisch und auch die Reflexionen sollten homogen sein (d.h. der Raum färbt den Klang nicht durch z.B. Kammfilter wie in einem Badezimmer). Auch Dickreiter beschreibt diese Möglichkeit der Annäherung in seinem Buch:

*„Das Diffusfeld eines Raumes wirkt ähnlich mittelwertbildend wie die Verwendung mehrerer, kreisförmig um das Instrument angeordneter Mikrofone [...]“* (Dickreiter 1997: 99).

Die HAW Hamburg ist in der Fakultät Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau im Besitz eines solchen Hallraumes. Nach einer Besichtigung ist leider jedoch festzustellen, dass dieser nicht für diese Arbeit geeignet ist, da sich ein riesiges Rumpfteil eines Flugzeugs in ihm befindet. Durch dieses Rumpfteil und weitere akustische Einschränkungen des Raumes weist dieser Raum erst ab einer Frequenz von 500Hz die Merkmale eines Hallraums auf. Als Alternative wurde der Hallraum der FH Lübeck für die Messung gefunden.

### 6.2.2 Hallraum FH Lübeck

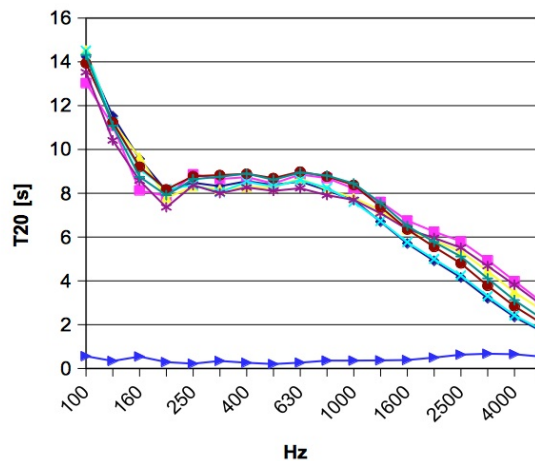
Der Hallraum der FH Lübeck ist in der Fakultät angewandte Naturwissenschaften, Labor für technische Akustik, eingegliedert. Er besitzt ein Raumvolumen von  $185m^3$  mit einer Grundfläche von  $48m^2$  und ist für Messungen des Absorptiongrades nach DIN EN ISO 354:2003 ausgelegt. Zur Vermeidung von Flatterechos und Raummoden wurden alle sich gegenüberliegenden Wände nicht-parallel zueinander gebaut. Um ein noch diffuseres Schallfeld zu erhalten, wurden von der Decke fünf halbrunde, ein mal ein Meter große Stahlplatten von der Decke gehängt. Die Werte für die Nachhallzeit können aus der Grafik (Abb. 6.6) entnommen werden.

Wie aus dem Graphen zu sehen ist, sinkt die Nachhallzeit mit steigender Frequenz. Um diese spektrale Färbung aus der Messung auszuschließen, soll in der Analyse mit der Dauer des Messwertes experimentiert werden. In z.B. einer Sekunde (der Schall legt in dieser Zeit ca. 343m zurück) sollten alle Informationen, die die Gitarre abstrahlt, durch Reflexionen am Mikrofon angetroffen sein.

### 6.2.3 Messversuch im Hallraum

Für die Messung im Hallraum stand das selbe Equipment wie für die Messung im Hohlraum zur Verfügung. Da für den Impulshammer kein Motor vorhanden ist, musste ich während der Messung mit im Hallraum sein. Die Gitarre wurde wie für die erste Messung an einem kleinem Tisch fixiert. Das Equipment wurde unter dem Tisch aufgebaut. Positioniert wurde der Tisch in einer Ecke des Raumes mit einem Meter Abstand zu den Wänden. Das Mikrofon wurde mit einem Stativ auf eine Höhe von

## 6 Messaufbau und Messdaten



**Abbildung 6.6:** Nachhallzeiten des Hallraumes im Frequenzbereich 100Hz-5kHz

1,5m gebracht. Es wurden vier Messpunkte im Raum genommen, um eventuelle Positionsunterschiede ermitteln zu können (die übrigen drei Ecken mit einem Meter Abstand zu den Wänden und einmal in der Mitte des Raumes). Dickreiter empfiehlt für die Position des Mikrofons und der Schallquelle einen Abstand von 0,5m Abstand zu Begrenzungsflächen (vgl. Dickreiter, *Handbuch der Tonstudioteknik*, Band 1, S. 385). An jedem Messpunkt wurden fünf Aufnahmen gemacht. Die größte Schwierigkeit entstand durch meine Anwesenheit im Raum. Durch die lange Nachhallzeit war jede meiner Bewegungen lange im Raum zu hören. Um die Messergebnisse dadurch nicht zu verfälschen, mussten die Aufnahmen danach aufmerksam kontrolliert werden.

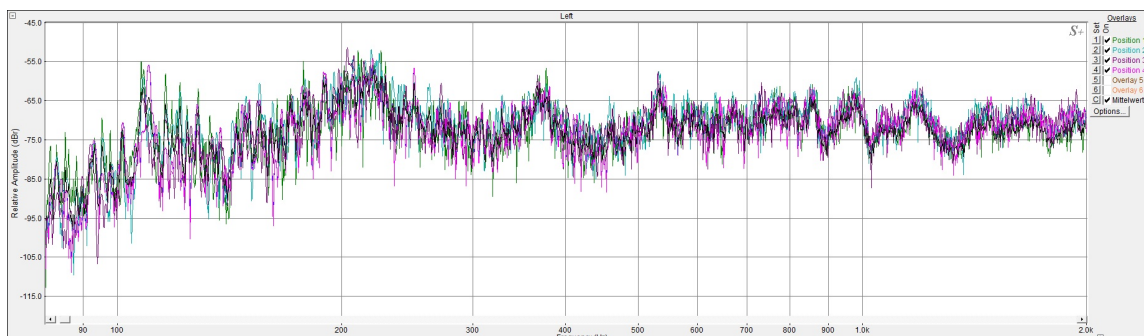


**Abbildung 6.7:** Messaufbau im Hallraum

## 7 Auswertung

Für die Auswertung habe ich mich aus Übersichtlichkeitsgründen auf die Präsentation von sechs, für mich charakteristischen, Messwerten beschränkt. Die Positionen liegen bei: 4cm, 14cm, 20cm (direkt unter dem Steg), 30cm, 38cm (im Mittelpunkt des Schallochs) und 46cm. Die Zentimeterangaben beziehen sich auf den Abstand des Mikrofons zur Klinkenbuchse. Die Wahl von vier Messpunkten unterhalb des Schallochs beruht auf den Informationen zur Verteilung von Deckenresonanzen im unteren Teil der Decke (s. Kapitel 2.5.1). Der zu untersuchende Frequenzbereich wurde auf einen Bereich von 80Hz bis 2kHz festgelegt. Dieser Bereich wird als ausreichend für einen Vergleich angesehen. Die Grundabstimmungen und der wichtige Frequenzbereich der Vokalfarbe  $a$  wird damit abgedeckt. Zudem muss mit steigender Frequenz durch die kürzer werdenden Wellenlänge zunehmend statisch gearbeitet werden. Für eine bessere Auflösung der Grafiken empfiehlt sich die digitale Version dieser Arbeit (s. Material A2)

Zunächst sollen ein paar Gedanken zum Hallraum gezeigt werden. Die Abbildung 7.1 zeigt den Mittelwert der Impulsantwort der Gitarre aus den vier Mikrofonpositionen im Hallraum.

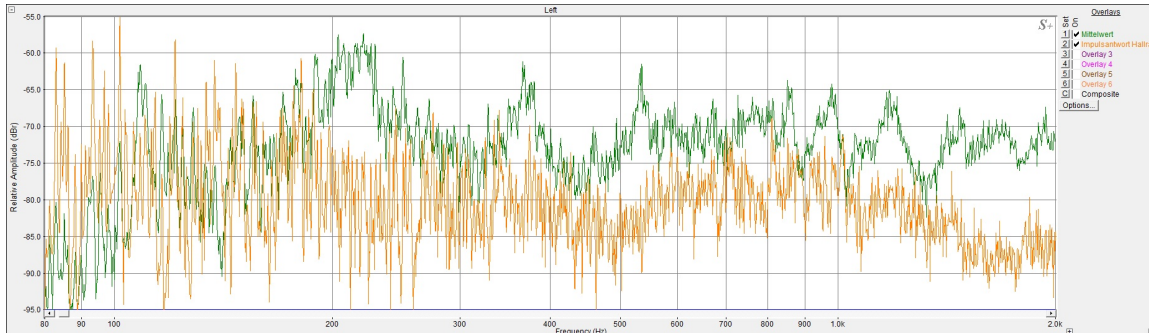


**Abbildung 7.1:** Zu sehen ist die Impulsantwort der Gitarre an vier Mikrofonpositionen und ihr Mittelwert (schwarze Kurve) im Hallraum

Analysiert wurde hierzu die erste Sekunde der Impulsantwort. Leider ist das Ergebnis dieses Mittelwerts sehr verschwommen und weist eine große Unregelmäßigkeit mit vielen Spitzen auf. Der Grund hierfür konnte nicht ermittelt werden. Neben einem lautem Grundrauschen (zu hören in A2, *Impulsantwort Hallraum.wav*) konnten die Raumeigenschaften mithilfe der Impulsantwort des Raumes nicht herausgerechnet werden. Die dazu aufgenommene Impulsantwort des Raumes wurde mit zwei Holzklötzen erzeugt und weist auch hier große Pegelunterschiede von bis zu 30dB beim

## 7 Auswertung

Vergleich von unterschiedlichen Frequenzbereichen auf. Die Anregung des Raumes durch die Holzklötze war dazu auch nicht optimal. Die Abbildung 7.2. zeigt diese Impulsantwort und den Mittelwert aus der Abbildung 7.1. Die Resonanzen der Gitarre wie z.B. die Helmholtzresonanz bei 110Hz und die erste Deckenresonanz bei 220Hz können aus der Abbildung 7.1 ermittelt werden. Es zeichnen sich auch kleinere Resonanzen im Bereich von 500Hz bis 2kHz ab. Feine Resonanzverläufe können jedoch nicht beurteilt werden.



**Abbildung 7.2:** Mittelwert der Impulsantwort der Gitarre im Hallraum (grün) und die Impulsantwort des Hallraums (orang)

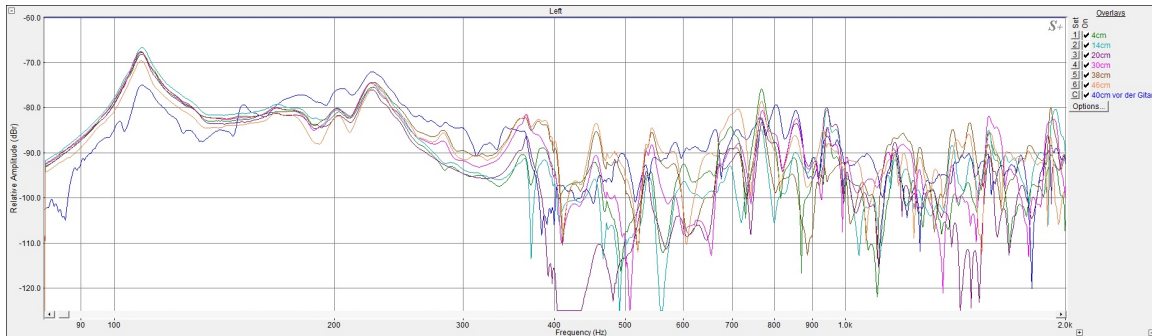
Aus diesen Unzulänglichkeiten schließend, wurde im Abstand von 40cm zur Gitarre auf Höhe des Stegs noch eine Impulsantwort der Gitarre aufgenommen. Dies soll im Vergleich mit eingebunden werden. Diese Idee stammt aus Curtins Vermessung von Geigen:

*„I have found that a single reading taken directly in front of the bridge gives a useful indication of an instruments behavior up to 800 Hz.“ (Curtin 2009: 17).*

Abbildung 7.3 zeigt für die oben beschriebenen Positionen im Hohlraum die Impulsantwort der Gitarre im Vergleich zur Impulsantwort des Mikrofons im Abstand von 40cm zum Steg. Die Abbildungen A.1 und A.2 zeigen den selben Plot zur Übersichtlichkeit mit einer geringeren Anzahl an Messposition.

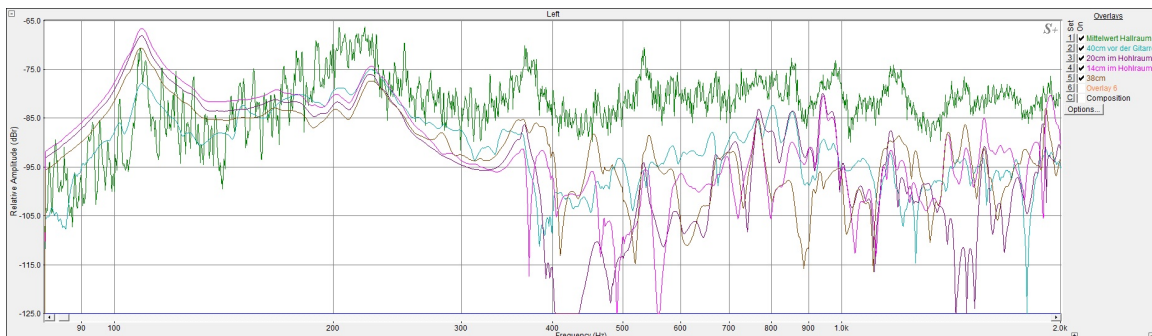
Zu erkennen ist das für alle Positionen im Bereich von 80Hz bis 300Hz eine hohe Ähnlichkeit untereinander auszumachen ist. Im Vergleich zur außen gemessenen Impulsantwort unterscheiden sich die Amplituden jedoch um bis zu 5dB. Im Bereich von 400Hz-500Hz weißt die Position unter dem Steg (20cm, lila) ein großes Loch auf. Die beiden Positionen unterhalb des Stegs (4cm, grün und 14cm, hellbau) haben zueinander einen sehr ähnlichen Verlauf, der sich aber ab der Frequenz von ca. 400 Hz stark von der außen gemessenen Impulsantwort unterscheidet. Die Impulsantwort am oberen Rand des Hohlraums bei 46cm weißt im Bereich von 400Hz-1kHz, bis auf zwei starke Spitzen bei 450Hz und 600Hz, eine hohe Ähnlichkeit zur äußeren Impulsantwort. Diese Ähnlichkeit gilt auch für die Position unter dem Schallloch bei 38cm. Auch hier ist jedoch wieder ein großer Unterschied im Bereich um 600Hz auszumachen und die gemessenen Amplitudenwerte im tiefen mittleren Frequenzbereich

## 7 Auswertung



**Abbildung 7.3:** Abgebildet sind die sechs Messpositionen und die Impulsantwort im Abstand von 40cm zur Gitarre

liegen trotz ähnlichem Verlauf gut 10dB tiefer. Die Abbildung 7.4. zeigt noch einmal einen Vergleich von drei Positionen im Hohlraum zur Impulsantwort der Gitarre im Hallraum und der Impulsantwort im Abstand von 40cm vor der Gitarre.



**Abbildung 7.4:** Abgebildet sind zwei Messpositionen im Hohlraum im Vergleich zur Impulsantwort der Gitarre im Hallraum und der Impulsantwort in 40cm Abstand zur Gitarre

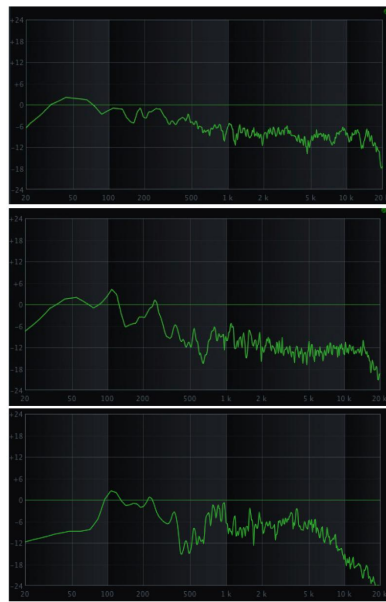
Ein Vergleich der beiden Positionen außerhalb der Gitarre ist schon sehr schwierig und nur der grobe Verlauf, vorallem bis 400Hz, lässt sich miteinander vergleichen. Eine Position mit der größten Korrelation zwischen den Messwerten im Hohlraum zu den Impulsantworten im Hallraum oder der Impulsantwort in 40cm Abstand konnte nicht ausfindig gemacht werden. Eine Auswertung der Impulsantworten mit Terzbändern könnte zumindest für den groben Verlauf eine höhere Korrelation liefern.



## 8 Weitere Probleme einer inwendigen Mikrofonierung

Der Hohlraum der Gitarre wird bei Live-Beschallungen nicht nur durch den Korpus angeregt. Neben der Front-Beschallung für das Publikum, werden gerade durch die Monitore stehende Wellen im Hohlraum erzeugt (s. Kapitel 2.5.2). Es wird also neben der Gitarre auch viel Übersprechen aufgenommen. Dies ist vermutlich ein Hauptgrund für akustische Rückkopplungen bei internen Mikrofonen. Die Rückkopplung entsteht durch eine Schleife, in der ein durch einen Schallwandler aufgenommenes Signal durch z.B. die Beschallung wieder und wieder aufgenommen wird. Als Versuch wurde die Gitarre mit rosa Rauschen beschallt. Das Messmikrofon wurde unter dem Steg platziert. In der Abbildung 8.1. ist oben das Frequenzspektrum des Rosa Rauschens zu sehen, das durch die Lautsprecher wiedergeben und vom Mikrofon im Diffusfeld aufgenommen wurde. Beim mittleren Bild wurde das Mikrofon unter dem Steg platziert. Das untere Bild ist aus den Aufnahmen mit dem Impulshammer entnommen. Das Mikrofon befindet sich dabei an der selben Position wie im mittleren Bild.

Zu sehen ist die Verstärkung des rosa Rauschens im Hohlraum bei den tiefen Frequenzen durch die Resonanzen. In Anbetracht der Abmessungen der Gitarre können die Spitzen um 380Hz ( $\lambda/2$ -Resonanz) und um 550Hz (erste Querresonanz im unteren Teil des Korpus) als Anregung von stehenden Wellen betrachtet werden. In einer Live-Beschallungs Situation müsste validiert werden, ob es in diesen Frequenzbereichen (z.B. um 110 Hz und 230 Hz) zu Rückkopplungen oder auch nur zum Dröhnen kommt. Abhilfe könnte hier das Einbauen von Equalizern im Mikrofonverstärker bringen, wie sie wahrscheinlich auch aus diesem Grund beim Lyric von L.R. Baggs verbaut sind (s. Kapitel 3.1.2).



**Abbildung 8.1:** Oben: Aufgenommenes rosa Rauschen durch die Lautsprecher mit dem Messmikrofon im Diffusschallfeld; Mitte: Messmikrofon befindet sich unter dem Steg; Unten: ermittelte Übertragungsfunktion der Gitarre bei einer Position unter dem Steg

## 9 Ergebnis und Fazit

Die Suche nach einer optimalen Mikrofonposition im Hohlraum konnte leider nicht erfolgreich beendet werden. Die Messergebnisse zeigen jedoch, dass es sinnvoll ist auf die Suche zu gehen. Eine Position direkt unter dem Steg muss nicht zwingend die am besten klingende Position sein. So sind schon bei den sechs gezeigten Positionen große Unterschiede im Spektrum zu erkennen und somit ein großer Unterschied im Klang zu erwarten. Für den Bau eines Prototyps sollte die oberste Primise sein, die Schwingungseigenschaften des Resonanzkörpers nicht zu beeinflussen. Die Befestigung des z.B. *Lyric* von L.R. Baggs am empfindlichsten Punkt der Gitarre kann kritisch hinterfragt werden. Eine Befestigung z.B. an einem Querbalken der Bodenplatte scheint da schon sinnvoller. Eine dann womöglich benötigte Halterung, um das Mikrofon an die geeignete Position zu bringen, müsste dann noch entwickelt werden. Dabei ist z.B. auf Faktoren wie das Mitschwingen der Halterung zu achten. Nichtsdestotrotz wäre der Einbau des Mikrofons ein größerer handwerklicher Eingriff. Leider konnten in diesem Rahmen auch keine Aufnahmen mit einem Gitarristen und unterschiedlichen Positionen des Mikrofons gemacht werden, um einen beseren Höreindruck der Positionen zu bekommen. Dazu kann das Mikrofon weiterhin mit dem Metallrohr durch die Gitarre geführt werden, während der Musiker im sitzen das Instrument spielt. Diese Aufnahmen werden aber sicherlich noch nachgeholt. Außer der rein analytischen Auswertung wäre mit den Aufnahmen noch ein Hörversuch mit Probanden möglich. Neben einem klanglichem Vergleich der sechs Positionen im Hohlraum ist noch der Vergleich mit Pickupsystemen und einer Mikrofonposition vor der Gitarre denkbar. Dadurch könnte die Sinnhaftigkeit bezüglich des Klangs einer Mikrofonierung im Hohlraum noch besser festgehalten werden. Ein solcher Versuch kann zudem durch die subjektive Wahrnehmung der einzelnen Probanden zu einer möglichen Position führen. Die Messungen zeigt jedoch schon wie in den Untersuchungen von Cough, dass Messungen im Hohlraum zur Charakterisierung von akustischen Gitarren genutzt werden kann. Auch hier gilt dies sicherlich wieder für die unteren beiden Oktaven der Gitarre von  $E=82\text{Hz}$  bis zum  $e'=329\text{Hz}$ . In diesem Bereich spielen sich die Grundabstimmungen der Gitarre ab. Dieser Messversuch kann also für Gitarrenbauer von Interesse sein, die ein messtechnisches Feedback zu ihrer Arbeit brauchen. Da nur an einer einzigen Gitarre gemessen wurde, ist von einer Verallgemeinerung abzusehen. Die erarbeiteten Grundlagen in dieser Arbeit und die Messversuche eröffnen Möglichkeiten zu weiteren Untersuchungen wie dem Hörversuch und zum Bau eines Prototyps.

Diese Arbeit hat mein persönliches Interesse an der musikalischen Akustik verstärkt und meine Kenntnisse, speziell bei der Gitarre, vergrößert. Gewonnene Erkenntnisse können aber auch auf andere Instrumente, vor allem in der Gruppe der

## *9 Ergebnis und Fazit*

Saiteninstrumente, übertragen werden. Dabei hat mir die Arbeit auch meine Grenzen in der digitalen Signalverarbeitung und Auswertung von Messdaten aufgezeigt. Mit der Bachelorarbeit wollte ich mich zum Ende meines Studiums noch einmal an ein ingenieurtechnisches Forschungsprojekt wagen, um für mich rauszufinden, ob dies eine Zukunft hat. Dies kann ich nun zumindest für einen Teil verneinen. Der Prozess, der Messversuch und die Thematik bis zur Auswertung haben mir jedoch eine große Freude bereitet und meine positive Einstellung zu Forschungsprojekten generell nicht getrübt.

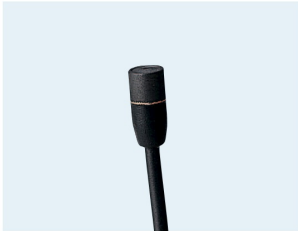
# A Material

## A.1 Datenblatt.

MKE 2 P-C

Microphones | Back-Electret Condenser Microphone Cat. No. 004224

**General Description**  
 The MKE 2 P-C is a high-quality, sub-miniature clip-on lavalier microphone which has a multitude of applications where other clip-on microphones prove too obtrusive because of their larger size. It fulfils the most stringent sound quality demands and is extremely robust. The MKE 2 P-C is suitable for both speech and instrument miking applications in all areas of live work. It can be directly attached to equipment with 12 – 48 V phantom powering. Colour: matt black.



**Features**

- Flat frequency response
- Good suppression of handling noise
- Delivery includes: 1 MKE 2 P-C clip-on microphone  
1 MZC 2-1 cap (short)

**Recommended Accessories**

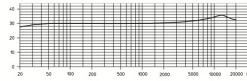
- Accessory set Cat. No. 004225  
consisting of: 2 MZW 2 (anthracite and nickel)  
2 MZQ 02 (anthracite and nickel)  
2 ZH 100 (anthracite and beige)  
1 carrying case
- MZM 2/MZM 10 magnetic mount set Cat. No. 001866

**Product Variants**

- MKE 2-S-C with open-ended cable, cable length 4 m, 31 mV/Pa ± 2.5 dB, black Cat. No. 003006
- MKE 2-S-3-C as MKE 2-S-C, but beige Cat. No. 003010
- MKE 2-2R-C with co-axial plug for SK 2012, cable length 1.6 m, 31 mV/Pa ± 2.5 dB, black Cat. No. 004218
- MKE 2-1053-C as MKE 2-2R-C, but with co-axial connector for BF 1083-U/BF 1083-V, 5 mV/Pa ± 3 dB Cat. No. 004223

**Technical Data**

Pick-up pattern	.....	omni-directional
Frequency response	.....	20 – 20,000 Hz ± 3 dB
Sensitivity (free field, no load) (1 kHz)	.....	10 mV/Pa ± 2.5 dB
Nominal impedance	.....	200 Ω
Min. terminating impedance	.....	1 kΩ
Equivalent noise level	.....	28 dB
A-weighted (DIN IEC 651)	.....	39 dB
CCR-weighted (CCR 468-3)	.....	39 dB
Max. SPL (1 kHz)	.....	130 dB (THD = 1 %)
Power supply	.....	phantom 12 – 48 V (± 4 V)
Supply current	.....	2.6 mA
Connector	.....	3-pin XLR with integral phantom power adaptor
Cable length	.....	3 m
Dimensions	.....	∅ 4.8 mm
Weight	.....	1 g



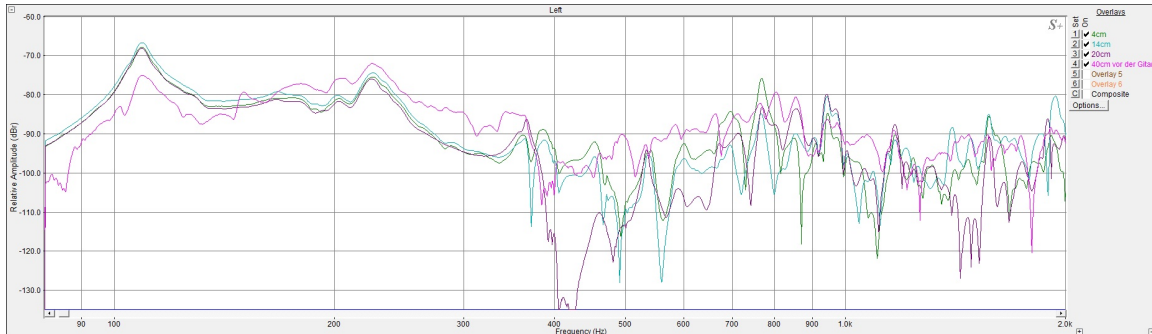
MZW 2	MZQ 02	ZH 102	MZM 2 MZM 10
anthracite nickel	anthracite nickel	anthracite beige	grey

## A.2 Datenträger

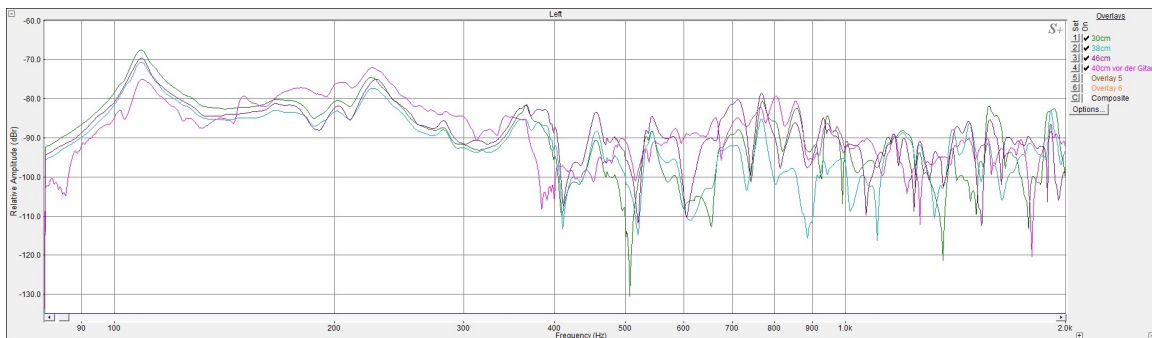
Im Anhang befindet sich eine CD mit einer digitalen Version der Bachelorarbeit. Zusätzlich sind im Ordner Audio noch zwei Impulsantworten im Waveformat (*Impul-*

santwort *Hohlraum.wav* und *Impulsantwort Gitarre unter dem Steg.wav*) als Beispiele zu finden.

### A.3 Grafiken



**Abbildung A.1:** Vergleich von drei Messwerten (4cm, 14cm und 20cm) im Hohlraum zur abgestrahlten Impulsantwort (mit einem Mikrofon 40cm vor der Gitarre aufgenommen)



**Abbildung A.2:** Vergleich von drei Messwerten (30cm, 38cm und 46cm) im Hohlraum zur abgestrahlten Impulsantwort (mit einem Mikrofon 40cm vor der Gitarre aufgenommen)

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Eigenschwingung, Grundschiwingung und Obertöne einer Saite . . . . .	7
2.2	Zeitlicher Verlauf des Klangspektrums eines Gitarrentones . . . . .	7
2.3	Zuordnung der Ausklingzeiten der Grundtöne auf unterschiedlichen Saiten zur Resonanzkurve des Gitarrenkorpus . . . . .	9
2.4	Schwingungsbilder bei den Resonanzfrequenzen der Decke. Die Graustufen entsprechen jeweils 4dB. Flächen mit gleichem Vorzeichen schwingen gleichphasig, der Stern deutet eine Phasenverschiebung von 90 Grad an, untere Abbildung mit Steg. . . . .	11
2.5	Schwingungsbilder einer Platte mit der Phasenlage, rechts sind die Kreuz- und Ringmode zu sehen . . . . .	12
2.6	Schallverteilung von Hohlraumresonanzen . . . . .	13
3.1	L.R. Baggs <i>Lyric</i> auf der Unterseite eines Stegs . . . . .	16
3.2	Piezotonabnehmer Takamine PT-007S . . . . .	18
4.1	Gemessener und berechneter Schalldruck zweier Geigen . . . . .	20
5.1	Oben: Übertragungsfunktion eines Systems; Unten: Zeitsignal des Hammers . . . . .	23
6.1	gemessener Frequenzgang des Impulshammers Kistler 8614A500M1 . . . . .	24
6.2	Zeitsignal des Impulshammers . . . . .	25
6.3	Zeitsignal des Impulshammers bei maximaler Auflösung der Amplitude . . . . .	25
6.4	Messaufbau; noch ohne die Molton-Rahmen . . . . .	26
6.5	Polardiagramm für die Frequenzen 102Hz und 204Hz, 176Hz und 436 Hz einer Gitarre . . . . .	27
6.6	Nachhallzeiten des Hallraumes im Frequenzbereich 100Hz-5kHz . . . . .	29
6.7	Messaufbau im Hallraum . . . . .	29
7.1	Zu sehen ist die Impulsantwort der Gitarre an vier Mikrofonpositionen und ihr Mittelwert (schwarze Kurve) im Hallraum . . . . .	30
7.2	Mittelwert der Impulsantwort der Gitarre im Hallraum (grün) und die Impulsantwort des Hallraums (orang) . . . . .	31
7.3	Abgebildet sind die sechs Messpositionen und die Impulsantwort im Abstand von 40cm zur Gitarre . . . . .	32

## Abbildungsverzeichnis

7.4	Abgebildet sind zwei Messpositionen im Hohlraum im Vergleich zur Impulsantwort der Gitarre im Hallraum und der Impulsantwort in 40cm Abstand zur Gitarre . . . . .	32
8.1	Oben: Aufgenommenes rosa Rauschen durch die Lautsprecher mit dem Messmikrofon im Diffusschallfeld; Mitte: Messmikrofon befindet sich unter dem Steg; Unten: ermittelte Übertragungsfunktion der Gitarre bei einer Position unter dem Steg . . . . .	34
A.1	Vergleich von drei Messwerten (4cm, 14cm und 20cm) im Hohlraum zur abgestrahlten Impulsantwort (mit einem Mikrofon 40cm vor der Gitarre aufgenommen) . . . . .	38
A.2	Vergleich von drei Messwerten (30cm, 38cm und 46cm) im Hohlraum zur abgestrahlten Impulsantwort (mit einem Mikrofon 40cm vor der Gitarre aufgenommen) . . . . .	38



# Literaturverzeichnis

- Adam, Christian: *Die richtige Stegposition*, <http://www.geigenbau.com/tippsundtricks/tipps/geigensteg/stegposition.html>, letzter Zugriff: 22.03. 2016
- Bader, Rolf: *Computational Mechanics of the Classical Guitar*, Springer 2005
- Curtin, Joseph: „Measuring Violin Sound Radiation Using an Impact Hammer“, *J. Violin Soc. Am.: VSA Papers*
- Dickreiter, Michael: *Handbuch der Tonstudioteknik*, K.G. Saur 1997, Band 1, 6. Auflage
- Fishman, Larry: *A Piezo Pionier*, [http://www.premierguitar.com/articles/A\\_Piezo\\_Pioneer](http://www.premierguitar.com/articles/A_Piezo_Pioneer), 2013, letzter Zugriff: 22.03. 2016
- Gough, Colin: „Acoustic Characterization of violin family Signature modes by internal cavity Measurements“, *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference 2013*, SAMC 2013
- Kuttruff, Heinrich: *Room Acoustics*, 3. Aufl., Elsevier 1991
- Meyer, Jürgen: *Akustik der Gitarre in Einzeldarstellungen*, Bochinsky 1985
- Meyer, Jürgen: *Akustik und Musikalische Aufführungspraxis*, 6. überarbeitete Auflage, Bochinsky 2015
- Mores, Robert: „Saiteninstrument“, in: Weinzierl, Stefan (Hrsg.): *Akustische Grundlagen der Musik*, Laaber Verlag, 2014
- Stoll Guitars: *Fachwissen Gitarrenbau: Das Schallloch und seine Bedeutung für den Klang*, <http://www.stollguitars.de/de/schallloch-der-gitarre-groesse-position-form-einfluss-klang/>, 2015, letzter Zugriff: 22.03. 2016
- Waltner, Angela „Aspekte des Gitarrenklangs“, *Skript eines Vortrags anlässlich der Gitarrenwoche Zeven*, 2005
- Weinzierl, Stefan (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*, Springer Verlag 2008
- Stefan Weinzierl: „Schallereignisse und Musik. Typologie, Beschreibung, Analyse“, Weinzierl, Stefan (Hrsg.): *Akustische Grundlagen der Musik*, Laaber Verlag 2014

Ich versichere, die vorliegende Arbeit selbstständig ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt zu haben. Die aus anderen Werken wörtlich entnommenen Stellen oder dem Sinn nach entlehnten Passagen sind durch Quellenangaben eindeutig kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Patrick Dadaczynski