

BACHELORARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades B. Sc. in Medientechnik

# Virtuelle Mandoline – Klangsynthese durch digitale Faltung

vorgelegt am 23.09.2022 von

Jan Klier

Matrikelnummer: 

1. Prüfer: Prof. Dr. Robert Mores

2. Prüfer: M. A. Tobias Falke

---

HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE  
WISSENSCHAFTEN HAMBURG

Fakultät Design, Medien und Information

Department Medien

Studiengang Medientechnik

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>IV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung.....	1
1.2 Gang der Untersuchung .....	2
<b>2 Die Faltungsoperation – theoretische Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1 Lineare, zeitinvariante Systeme .....	4
2.2 Impulsantwort eines LTI-Systems .....	5
2.3 Digitale Faltung.....	8
2.4 Fourier-Transformation zur schnellen Faltung .....	10
<b>3 Die elektrische Gitarre als Generatorinstrument.....</b>	<b>12</b>
3.1 Der Klangentstehungsprozess einer elektrischen Gitarre.....	13
3.1.1 Single Coil-Pickup in Halsposition .....	16
3.1.2 Humbucker in Stegposition .....	18
3.2 Die Gitarre als lineares, zeitinvariantes System .....	20
<b>4 Die Mandoline als übertragendes System.....</b>	<b>24</b>
4.1 Aufbau und Eigenschaften der Mandoline.....	24
4.2 Messung des Übertragungsverhaltens.....	26
4.2.1 Anforderungen an die Messmethode .....	27
4.2.2 Die Impulshammer-Methode.....	27

<b>5</b>	<b><i>Praktische Umsetzung der Messung</i></b> .....	<b>29</b>
5.1	Versuchsaufbau und -durchführung .....	29
5.2	Diskussion der Ergebnisse .....	31
5.2.1	Vorabuntersuchung und Relevanz für das Ergebnis .....	31
5.2.2	Optimierungsoptionen der Messung und Auswertung.....	34
5.2.3	Auswertung der Impulsantworten .....	35
5.2.4	Spektrale Auswertung des Übertragungsverhaltens .....	39
<b>6</b>	<b><i>Klangsynthese durch digitale Faltung</i></b> .....	<b>43</b>
6.1	Erzeugung des Eingangssignals .....	43
6.2	Digitale Faltung mittels MATLAB .....	46
6.3	Vergleich und Diskussion der Ergebnisse .....	49
6.3.1	Vergleich der Tonabnehmer-Konfiguration .....	49
6.3.2	Vergleich der Messungen von Mikrofon und Sensor .....	53
6.3.3	Vergleich und Bewertung der Übertragungsfunktionen.....	54
6.3.4	Bewertung der Faltungsergebnisse.....	56
<b>7</b>	<b><i>Echtzeit-Anwendung mittels Hardware</i></b> .....	<b>58</b>
7.1	Torpedo Captor X von <i>Two Notes</i> .....	59
7.2	Anwendung im Live-Setting.....	60
7.2.1	Voraussetzungen und Probleme der Methode.....	60
7.2.2	Analyse der Anwendung in Echtzeit.....	62
7.3	Die virtuelle Mandoline in der Mischung.....	64
<b>8</b>	<b><i>Fazit</i></b> .....	<b>67</b>
<b>9</b>	<b><i>Ausblick</i></b> .....	<b>69</b>
	<b><i>Literaturverzeichnis</i></b> .....	<b>VII</b>
	<b><i>Abbildungsquellen</i></b> .....	<b>IX</b>
	<b><i>Anhang</i></b> .....	<b>XI</b>
	<b><i>Eigenständigkeitserklärung</i></b> .....	<b>XV</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Rechtecksignal $d(t)$ der Breite $T_0$ , (Görne, 2015, S. 137).....	5
Abbildung 2: Approximation einer Zeitfunktion $x(t)$ , (Görne, 2015, S. 138).....	6
Abbildung 3: Dirac-Funktion $\delta t$ , Vgl. (Mietzner, 2020).....	6
Abbildung 4: Diskrete Dirac-Funktion $\delta n$ , Vgl. (Mietzner, 2020).....	8
Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung der Faltungsoperation .....	12
Abbildung 6: Klangentstehung einer E-Gitarre .....	13
Abbildung 7: Skizze einer <b>HSS</b> Stratocaster, (depositphotos.com, 2022) .....	15
Abbildung 8: Ersatzschaltbild eines PUs, Vgl. (Curdt, 2022) .....	16
Abbildung 9: Aufbau eines Single Coil-PUs, links (Zollner, 2009).....	17
Abbildung 10: Querschnitt eines SC-PUs, rechts (Zollner, 2009) .....	17
Abbildung 11: Knotenpunkte der ersten vier Harmonischen einer Gitarre, (Rossing & Caldersmith, Guitars and Lutes, 2010).....	18
Abbildung 12: Aufbau eines Humbuckers nach Mike McDonald, links (Zollner, 2009) .....	19
Abbildung 13: Querschnitt eines Gibson Humbuckers, rechts (Zollner, 2009) .....	19
Abbildung 14: Vereinfachtes Blockschaltbild einer E-Gitarre .....	21
Abbildung 15: Erweitertes Blockschaltbild des Übertragungsverhaltens einer E-Gitarre .....	22
Abbildung 16: Vereinfachte Darstellung der Faltungsoperation .....	24
Abbildung 17: Skizze einer Mandoline, (Pixabay, 2022) .....	26
Abbildung 18: Neapolitanische Mandoline zur Vermessung .....	28
Abbildung 19: Blockschaltbild Messung der Impulsantwort .....	30
Abbildung 20: Normierte Impulsantwort der Ibanez-Gitarre .....	31
Abbildung 21: Einflussfaktoren der Impulsmessung.....	33
Abbildung 22: Recording der Impulsantwort, oben Anschlag des Hammers, unten gemessene IR.....	35
Abbildung 23: Laufzeitunterschiede bei der Messung mit Mikrofon .....	36
Abbildung 24: Norm. IR der Hofer Gitarre, aufgenommen mit Mikrofon (M1).....	37
Abbildung 25: Norm. IR der Hofer Gitarre, aufgenommen mit Sensor (S1). .....	37
Abbildung 26: Norm. IR der Hofer Gitarre, aufgenommen mit Sensor (S1) [Zoom in].....	37

Abbildung 27: Norm. IR der Mandoline, aufgenommen mit Sensor (S1) [Zoom in].....	38
Abbildung 28: Norm. Übertragungsfunktion der Mandoline, aufgenommen mit Sensor (S1). .....	40
Abbildung 29: Norm. Übertragungsfunktion der Mandoline, aufgenommen mit Sensor (S2). .....	40
Abbildung 30: Übertragungsfunktion der Hofer-Gitarre, aufgenommen mit Sensor (S1).....	41
Abbildung 31: Einfaches Blockschaltbild der Faltungsoption .....	43
Abbildung 32: Erzeugung des Eingangssignals.....	44
Abbildung 33: Dauer der Faltung in MATLAB. ....	47
Abbildung 34: Spektrum des Steg-Tonabnehmers über 1 s (Humbucker).....	50
Abbildung 35: Spektrum des Hals-Tonabnehmers über 1 s (Single Coil).....	50
Abbildung 36: Spektrum der virtuellen Mandoline (NPU) [Zoom in]. ....	52
Abbildung 37: Übertragungsfunktion der Mandoline, aufgenommen mit Sensor (S3).....	54
Abbildung 38: Wellenform der Datei y(t)_Mando_S3xREM_NPU.wav .....	55
Abbildung 39: Signalweg der Echtzeit-Realisierung.....	59
Abbildung 40: Torpedo Remote, IR Manager. ....	63
Abbildung 41: Versuchsdurchführung im ET-Labor der HAW Hamburg.....	XIV

## Abkürzungsverzeichnis

DAW .....	Digital Audio Workstation
DFT .....	Diskrete Fourier Transformation
FFT .....	Fast Fourier Transformation
FIR .....	Finite Impulse Response
FT .....	Fourier Transformation
HSS .....	Humbucker / Single Coil / Single Coil
IR .....	Impulse Response
LTI .....	Linear and Time-Invariant
PU .....	Pickup (Engl.: Tonabnehmer)
SI .....	Système international d'unités

# 1 Einleitung

## 1.1 Zielsetzung

Die elektrische Gitarre ist ein bedeutendes Instrument der populären Musik. Sie findet Anwendung in verschiedenen Genres wie Pop, Jazz, Blues, Funk und ist elementarer Bestandteil von Musikrichtungen wie Rock oder Metal. Die „E-Gitarre“ ist ein sehr vielseitiges Instrument, welches verschiedene Klänge erzeugen kann und deren Sound sich verändern lässt. Gitarristen nutzen dafür unter anderem Effektpedale, die das Signal des Instrumentes „manipulieren“, bevor es wiedergegeben wird. Dadurch kann das Gespielte verzerrt, räumlich oder atmosphärisch klingen, mittels Effekten wie Distortion, Hall, Chorus, oder Phaser. Jedoch lässt sich der charakteristische Klang des Instrumentes dabei stets erkennen.

Diese Überlegung wirft die Frage auf: Kann eine elektrische Gitarre genutzt werden, um wie ein anderes Instrument zu klingen? Zur Untersuchung dieser Fragestellung wird überprüft, ob sich durch Klangsynthese ein anderes Saiteninstrument authentisch simulieren lässt. Die Mandoline wird hierfür verwendet, da sie Gemeinsamkeiten mit, aber auch Unterschiede zu einer Gitarre besitzt.

Ziel der Betrachtung ist es, die elektrische Gitarre als sogenanntes Generatorinstrument zu verwenden, um durch digitale Faltung eine virtuelle Mandoline zu simulieren. Dabei soll erörtert werden, wie hoch der eigene Klanganteil der Gitarre am Gesamtklangbild der virtuellen Mandoline ist und inwiefern sich dieser Aspekt in Richtung einer authentischen Simulation optimieren lässt. Zusätzlich soll geprüft werden, welche Faktoren entscheidend sind, um den Klang einer Mandoline zu synthetisieren.

Darüber hinaus kann erörtert werden, wie eine Implementierung dieser Simulation einen Anwendungsbereich für Musiker schafft. Notwendig sei eine Echtzeit-Realisierung der virtuellen Mandoline, welche mit wenig Rechendauer die Faltungsoperation ohne nennenswerte Latenz für den Musizierenden umsetzen kann. Dabei sei interessant zu überprüfen, wie authentisch das Ergebnis des virtuellen Instrumentes ist und wie es sich im Zusammenhang zu weiteren Instrumenten bewerten lässt.

## 1.2 Gang der Untersuchung

Zunächst werden theoretische Grundlagen beschrieben, welche Voraussetzung zum Verständnis der verwendeten Methoden dieser Untersuchung sind. Zur Betrachtung der genutzten Instrumente, wird in dieser Arbeit auf die elektrische Gitarre als „Klanggenerator“ eingegangen. Dabei werden Aufbau und Funktionsweise erläutert sowie spezifische Eigenschaften des Instrumentes betrachtet. Ebenso wird die Mandoline betrachtet, es werden Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Instrumente diskutiert und die klanglichen Attribute der Mandoline analysiert. Um diese Attribute erfassen zu können, wird die Impulsantwort des Instrumentes gemessen. Das hierfür verwendete Verfahren wird erläutert und das Ergebnis diskutiert.

Mittels der gewonnenen Informationen wird durch das Prinzip der digitalen Faltungsoperation eine Klangsynthese angestrebt. Die Grundlagen der Faltung werden in theoretischer Form erläutert und mit der praktischen Umsetzung in Verbindung gesetzt. Hierfür wird die Software MATLAB genutzt. Im Anschluss wird erörtert, wie die digitale Faltung durchgeführt werden kann, um eine Anwendung der virtuellen Mandoline in Echtzeit zu ermöglichen. Die hierfür notwendige Implementierung wird diskutiert und bewertet werden. Zum Abschluss dieser Arbeit wird eine Mischung eines populären Songs angestrebt, bei dem die virtuellen Instrumente genutzt werden. Es wird folglich ein Fazit des Versuches gezogen und ein Ausblick auf weitere Untersuchungs- und Optimierungsmöglichkeiten gegeben.

Da diese Ausarbeitung keine reine theoretische Betrachtung ist, werden Versuche in Aufbau und Umsetzung beschrieben sowie deren Einfluss auf die gewonnenen Erkenntnisse erläutert. Um einen ersten Eindruck zu erlangen, wird zunächst ein Vorversuch realisiert, bei dem die Impulsantwort einer akustischen Gitarre gemessen und mit dem Eingangssignal einer elektrischen Gitarre gefaltet wird. Mit den daraus gewonnen Erkenntnissen wird im Anschluss der Versuch wiederholt und mit dem der Mandoline verglichen. Die Faltung von Instrumenten zur Klangsynthese ist ein weites Feld und kann beliebig ausgeweitet werden. Diese Arbeit möchte Anregung zum Nutzen der Faltungsoperation für Musizierende geben.

## 2 Die Faltungsoperation – theoretische Grundlagen

Die digitale Faltung zweier Signale ermöglicht die Schaffung eines daraus resultierenden, neuen Signals. Im Anwendungsbereich der Tontechnik lässt sich mit einem Faltungshall die Schallübertragung eines Instrumentes in einem Raum simulieren. Vereinfacht ausgedrückt, das Instrument klingt nach der Faltung räumlich, weil ihm der Raumanteil des Schalles „hinzugefügt“ wird. Eine weitere Möglichkeit für die Faltung zweier Signale ist die Simulation eines Instrumentes. Durch die Faltungsoperation lassen sich dessen spezifische klangerzeugende Eigenschaften nutzen. Benötigt werden dafür ein Eingangssignal, welches ein System anregt, sowie ein Signal, welches dieses System beschreibt. Unter einem Signal wird dabei die Übertragung einer Information verstanden. Häufig sind Signale Schwingungen, von beispielsweise akustischer oder elektrischer Natur, deren Übertragungseigenschaften eine Information bereitstellen.<sup>1</sup>

Um für diese Untersuchung mit einer elektrischen Gitarre den Klang einer Mandoline zu simulieren, müssen die klanglichen Eigenschaften der Mandoline erfasst werden. Dabei stellt die „E-Gitarre“ das Eingangssignal der Faltungsoperation dar, welches mit den gemessenen Übertragungsverhalten der Mandoline („der Impulsantwort“) gefaltet wird. Ziel ist, dass das entstandene Ausgangssignal nach der Faltung wie das übertragende Instrument klingt und nicht wie eine E-Gitarre.

Die idealisierte Betrachtung der Faltungsoperation ist in der Realität näherungsweise möglich. Um ein authentisches Ergebnis zu erhalten, werden zunächst die theoretischen Grundlagen der Faltungsoperation beleuchtet, um Rückschlüsse auf die praktische Anwendung ziehen zu können. Hierbei wird insbesondere die Literatur von Görne (2015) verwendet. Zunächst wird das Übertragungsverhalten eines Instrumentes als System betrachtet, weswegen eine besondere Klasse von System im Folgenden beschrieben wird.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Vgl. (Görne, 2015, S. 135 f.)

<sup>2</sup> Vgl. (Görne, 2015, S. 136)

## 2.1 Lineare, zeitinvariante Systeme

Vereinfacht gesprochen ist ein System ein „[...] Ding, das Signale übertragen und verändern kann“ (Görne, 2015, S. 136). Dies können Lautsprecher, Mikrofone oder eine elektrische Gitarre sein. Um komplexe Systeme vereinfacht darzustellen, kann ein Ausgangssignal  $y(t)$  als Reaktion auf ein Eingangssignal  $x(t)$  betrachtet werden. Diese Reaktion wird auch als Systemantwort bezeichnet. Ein- und Ausgangssignal können hierbei als beliebige Zeitfunktionen dargestellt werden:

$$x(t) \rightarrow \text{System} \rightarrow y(t)^3$$

Lineare, zeitinvariante Systeme<sup>4</sup> stellen eine Klasse von Systemen dar, welche die Faltung zweier Signale ermöglicht. **Linearität** bedeutet, dass die Summe zweier Signale die Systemantwort ergibt, ebenso wie die Einzelsummen der beiden jeweiligen Systemantworten (Superpositionsprinzip). Für digitale Signale (Signale mit diskreten Werten) gilt:

$$\begin{aligned}x[n] &= \alpha * x_1[n] + \beta * x_2[n] \\S\{x[n]\} &= \alpha * y_1[n] + \beta * y_2[n] = y[n]\end{aligned}$$

Folglich:

$$S\{\alpha * x_1[n] + \beta * x_2[n]\} = \alpha * S\{x_1[n]\} + \beta * S\{x_2[n]\}$$

Statt die Funktionen in Abhängigkeit eines kontinuierlichen Zeitwertes  $t$  zu stellen, sind sie in der diskreten Betrachtungsweise abhängig vom Wert eines Samples  $n$ .

**Zeitinvarianz** bedeutet, dass zu jeder Zeit eine gleichbleibende Antwort des Systems zu erwarten ist:

$$S\{T\{x[n]\}\} = T\{S\{x[n]\}\}$$

---

<sup>3</sup> Vgl. (Görne, 2015, S. 136 f)

<sup>4</sup> Auch „LTI-Systeme“ genannt.

Ein Exempel für ein nicht-zeitinvariantes System ist das Downsampling: ( $y[n] = x[M * n]$ ), da beispielsweise bei  $M = 2$  eine Verschiebung von  $x[n]$  um einen Takt ein anderes Ergebnis hervorruft. Bei zeitinvarianten Systemen verschiebt sich das Ausgangssignal in dem Maße, in dem das Eingangssignal verschoben wird, eine Änderung der Form ergibt sich nicht.<sup>5</sup>

In der Realität sind Systeme niemals vollständig linear und zeitinvariant. Die Nichtlinearität kann dabei häufig vernachlässigt werden. In der Tontechnik erfüllen die meisten Geräte die Anforderungen eines LTI-Systems. Es treten dennoch einige nichtlineare Verzerrungen auf, welche als „Klirrfaktor“ bezeichnet werden. Es entstehen neue Teil-, bzw. Obertöne. Auch Räume (bei Verhallung) oder Musikinstrumente können als LTI-Systeme betrachtet werden. Beispiele für keine LTI-Systeme seien Kompressoren oder Gitarrenverstärker, da sie nicht-linear verzerren. Phaser- oder Flanger-Effekte sind hingegen nicht-zeitinvariant.<sup>6</sup>

## 2.2 Impulsantwort eines LTI-Systems

Eine Impulsantwort stellt die Reaktion eines LTI-Systems auf eine Anregung dar. Sie beschreibt das System vollständig. Jede beliebige Zeitfunktion  $x(t)$  lässt sich durch die Summe unendlich kleiner Rechtecke beschreiben. Stellt das Rechteck eine eigene Funktion  $d(t)$  mit der Höhe  $1/T_0$  und der Breite  $T_0$  dar (vgl. Abbildung 1), ergibt sich:

$$x(t) \approx \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT_0) * d(t - kT_0)T_0$$

$d(t - kT_0)T_0$  beschreibt ein um  $kT_0$  verschobenes Rechteck der Höhe 1, wobei  $x(kT_0)$  die Gewichtung der Amplitude an der Stelle  $kT_0$  ist.

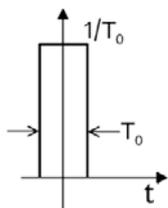


Abbildung 1: Rechtecksignal  $d(t)$  der Breite  $T_0$ , (Görne, 2015, S. 137).

<sup>5</sup> Vgl. (Mietzner, 2020)

<sup>6</sup> Vgl. (Görne, 2015, S. 137)

Ist das zu untersuchende System linear und zeitinvariant, kann die Antwort eines beliebigen LTI-Systems  $y(t)$  ebenso als Summe gewichteter Rechtecksignale betrachtet werden (vgl. Abbildung 2). Somit ergibt sich für die Systemantwort:

$$y(t) \approx \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT_0) * h(t - kT_0)T_0$$

Mit schmaler werdenden Rechtecken erhöht sich die Genauigkeit der Näherung. Wäre die Breite der Rechtecke unendlich klein  $\rightarrow 0$ , wäre die Näherung exakt.

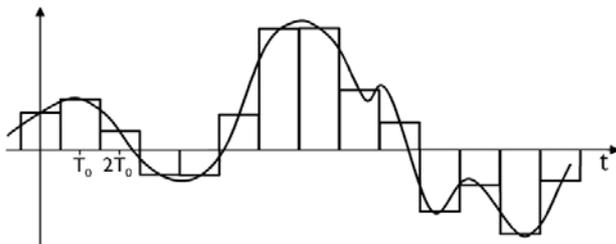


Abbildung 2: Approximation einer Zeitfunktion  $x(t)$ , (Görne, 2015, S. 138).

Eine Rechteckfunktion  $d(t)$  mit infinitesimal kleiner Breite wird als Dirac  $\delta(t)$ <sup>7</sup> bezeichnet. Da ein Dirac eine Zeitfunktion darstellt, entspricht eine Breite von  $-\infty$  einem unendlich schmalen Impuls mit unendlich großer Amplitude. Die Fläche des Dirac-Impulses beträgt wie bei der Rechteckfunktion den Wert 1, da  $T_0 * \frac{1}{T_0} = 1$ ; vgl. für diesen Abschnitt: (Görne, 2015, S. 137

f.)

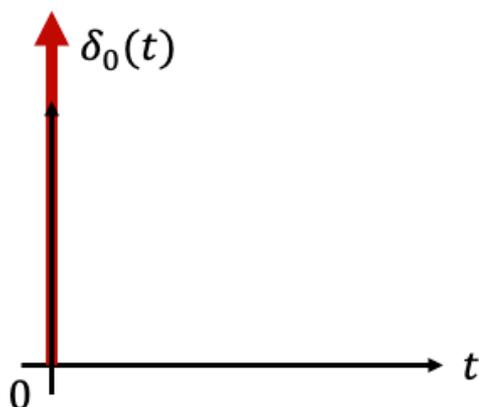


Abbildung 3: Dirac-Funktion  $\delta(t)$ , Vgl. (Mietzner, 2020)

<sup>7</sup> Der britische Physiker *Paul Dirac* entwickelte den „idealen Impuls“ als Werkzeug zur Beschreibung von Prozessen (Görne, 2015, S. 138).

Die Annäherung einer Zeitfunktion aus der Summe von Rechtecken mit unendlich kleiner Breite entspricht der Berechnung eines Integrals. Das Übertragungsverhalten eines Systems auf die Anregung mit dem Dirac-Impuls wird als **Impulsantwort**  $h(t)$  bezeichnet. Mit dem Einheitsimpuls  $\delta(t)$  lässt sich die Zeitfunktion eines Signals folgend beschreiben:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) * \delta(t - \tau) d\tau$$

Daraus ergibt sich zur Bestimmung des Ausgangssignals folgendes (Faltungs-)Integral:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) * h(t - \tau) d\tau$$

Diese Operation, auch Faltung zweier Signale genannt, beschreibt die Spiegelung ( $t - \tau$ ) der Impulsantwort  $h(t - \tau)$ , welche sukzessiv mit den Werten des Eingangssignals  $x(\tau)$  multipliziert wird, während diese gegeneinander verschoben werden ( $\int_{-\infty}^{\infty} d\tau$ ). Bei der Faltung eines Eingangssignales  $x(t)$  mit der Impulsantwort  $h(t)$ , erhält man folglich das Ausgangssignal des Systems:  $x(t) \rightarrow h(t) \rightarrow y(t)$ .

Die Faltungsoperation lässt sich vereinfacht  $y(t) = x(t) \otimes h(t)$  ausdrücken.<sup>8</sup>

Zusammenfassend wird das Verhalten von LTI-Systemen durch deren Antwort auf eine Impulsanregung beschrieben. Die Impulsantwort  $h(t)$  lässt sich durch einen Dirac-Impuls  $\delta(t)$  erzeugen und die Reaktion des Systems ergibt die Ausgangsfunktion  $y(t)$ . Die Faltungsoperation entspricht der Multiplikation zweier Funktionen innerhalb eines Integrals. Durch Faltung kann das Ausgangssignal eines Systems bestimmt werden, wenn ein Eingangssignal sowie eine Systemreaktion vorliegen. Vice versa kann bei bekannten Ein- und Ausgangssignalen auf die Eigenschaften eines Systems geschlossen werden.

Impulsantworten sind in der Theorie unendlich lang, wenn sie mit einem Dirac-Stoß von unendlich kurzer Dauer angeregt werden. In der digitalen Technik hingegen werden endlich lange Antworten verwendet („FIRs“)<sup>9</sup>. Sie sind theoretisch so lang, bis sie im Grundrauschen des Systems verschwinden. Das Anklopfen eines Instrumentes erzeugt einen kurzen Impuls, welcher zur Faltung verwendet werden kann. Dies ist für diese Untersuchung wichtig und wird

---

<sup>8</sup> Vgl. (Görne, 2015, S. 139)

<sup>9</sup> Kurz für „Finite Impulse Responses“

in den folgenden Kapiteln näher beleuchtet. Theoretisch können jede beliebigen Signale oder Systeme miteinander gefaltet werden, um interessante Klangeffekte zu erzeugen, vgl. (Görne, 2015, S. 141). Da für diese Arbeit digitale Signale zur Faltung verwendet werden, wird im Folgenden die Faltungsoperation mit diskreten Werten beschrieben und veranschaulicht.

### 2.3 Digitale Faltung

Die Faltungsoperation wurde im vorangegangenen Kapitel 2.2 bereits für periodische (analoge) Signale beschrieben. Bei der Faltung von digitalen Signalen, wie es beispielsweise mit der Software MATLAB möglich ist, werden diskrete Signalwerte (Samples) miteinander verrechnet. Da im digitalen Bereich endlich viele Impulsantworten messbar sind, wird das Faltungsintegral zur Summe einzelner Samplewerte. Die zeitdiskrete Funktion des Dirac-Impulses  $\delta[n]$  wird als einzelnes Sample mit der Amplitude 1 bei  $n = 0$  dargestellt, welches ansonsten eine unendlich lange Nullfolge beinhaltet:

$$\delta[n] = (\dots, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, \dots).$$

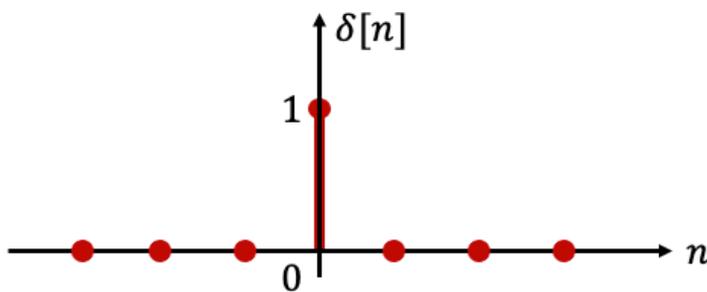


Abbildung 4: Diskrete Dirac-Funktion  $\delta[n]$ , Vgl. (Mietzner, 2020).

Ebenso ist das Eingangssignal  $x[n]$  eines digitalen Systems eine diskrete Folge von Zahlen, bzw. Samplewerten. Für die Systemantwort  $y[n]$  der diskreten Faltungsoperation gilt:

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] * h[n - k],$$

vereinfacht geschrieben:

$$y[n] = x[n] \otimes h[n].^{10}$$

<sup>10</sup> Vgl. (Görne, 2015, S. 140)

Die digitale Faltung im Zeitbereich ist die Summe der Multiplikation zweier Zahlenfolgen mit diskreten Samplewerten, wobei die diskrete Impulsantwort gespiegelt wird:  $h[n - k]$ . Ein digitales LTI-System lässt sich durch die Faltung des diskreten Eingangssignals und der diskreten Impulsantwort beschreiben.

Für die diskrete Faltung gibt es zwei Möglichkeiten der Umsetzung. Zum einen mittels FIR-Filter im Zeitbereich, zum anderen durch die schnelle Faltung im Frequenzbereich. FIR-Filter sind Filter aus zeitlich begrenzten Impulsantworten, wobei die Samples  $n$  die Filterkoeffizienten darstellen.

Eine Alternative ist die schnelle Faltung durch Transformation der Signale in den Frequenzbereich. Dies geschieht mittels der schnellen Fourier-Transformation (FFT)<sup>11</sup>. Mit der FFT lässt sich aus der Impulsantwort die Übertragungsfunktion berechnen. Diese wird mit dem Fourier-transformierten Eingangssignal im Frequenzbereich multipliziert und das Ergebnis wird wieder in den Zeitbereich rücktransformiert. Aus der Ausdrucksweise für die diskrete Faltung  $y[n] = x[n] \otimes h[n]$  wird in der spektralen Darstellungsform  $Y[k] = X[k] * H[k]$ .<sup>12</sup>

Zu der für diese Untersuchung notwendigen Echtzeitberechnung der Faltung, wird ein Verfahren benötigt, welches möglichst wenig Latenz erzeugt. Da Rechenoperationen einen geringeren zeitlichen Aufwand besitzen, wenn weniger Rechenschritte vorhanden sind, kann davon ausgegangen werden, dass das Verfahren schneller ist, welches weniger Kapazitäten in Anspruch nimmt. Die Multiplikation zweier Signale im Frequenzbereich sei schneller als das Verrechnen jedes einzelnen Samplewertes im Zeitbereich. Zwar ist eine Transformation in den Frequenzbereich mittels FFT und abschließend die Rücktransformation in den Zeitbereich notwendig, dennoch ist das Verfahren weniger zeitintensiv als die Verwendung von FIR-Filtern.<sup>13</sup>

Da die Umsetzung im Frequenzbereich für den Anwendungsfall der Echtzeit-Faltung der E-Gitarre geeigneter erscheint, wird die dafür notwendige Transformation aus dem Zeitbereich im Folgenden beschrieben.

---

<sup>11</sup> Engl.: Fast Fourier Transformation

<sup>12</sup> Vgl. (Görne, 2015, S. 140)

<sup>13</sup> Vgl. (Görne, 2015, S. 140 f.)

## 2.4 Fourier-Transformation zur schnellen Faltung

Die Darstellung von Signalen kann als zeitliche Funktion erfolgen. Mit der zeitlichen Änderung von Spannung oder Schalldruck werden Informationen übertragen. Dank der Fourier-Transformation (FT)<sup>14</sup> ist die Betrachtung eines Signals im sogenannten Frequenzbereich möglich. Eine spektrale Darstellung hilft Teiltöne und Phasenbeziehungen eines akustischen oder elektrischen Signals zu analysieren.

Durch die komplexe Schreibweise eines Signals, kann dieses als Eigenfunktion eines LTI-Systems wiedergegeben werden:  $x(t) = e^{j\omega t}$ , wobei  $\omega = 2\pi f$  die Kreisfrequenz darstellt. Mit Hilfe dieser lässt sich die frequenzabhängige Übertragungsfunktion  $H(f)$  aus der Impulsantwort  $h(t)$  berechnen:  $H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-2j\pi f t} dt$ . Diese Operation wird als Fourier-Transformation  $F\{h(t)\}$  bezeichnet. Bei realen Systemen wird die transformierte Funktion häufig „Frequenzgang“ genannt. Für die Fourier-Transformation eines beliebigen Signales gilt:  $Y(f) = F\{y(t)\}$ . Zur Rücktransformation in den Zeitbereich wird die inverse FT verwendet:  $y(t) = F^{-1}\{Y(f)\}$ .

Da für diese Untersuchung eine digitale Faltung zweier Signale mit diskreten Werten durchgeführt wird, ergibt sich für die diskrete Fourier-Transformation (DFT):  $F\{y(n)\} = Y[k] = \sum_{n=0}^{M-1} y[n] e^{-j2\pi n k / M}$ , wobei  $k = 0, \dots, M - 1$ . Diskrete Signale werden auf  $M$  Werte beschränkt, da davon ausgegangen wird, dass das Signal nicht-periodisch ist oder seine Periodendauer  $M$  sei. Für Rücktransformation gilt die inverse DFT:  $F^{-1}\{Y[k]\} = y[n]$ .

Die zur schnellen Faltung notwendige (inverse) FFT basiert auf Grundlage der (inversen) DFT. Durch maschinennahe Programmierung und Ausnutzung der Zweier-komplement-Codierung eines Computers wird im Vergleich zur DFT Rechenzeit gespart (vgl. für diesen Abschnitt (Görne, 2015, S. 141-147)).

Zusammenfassend entspricht die Faltung im Zeitbereich einer Multiplikation im Frequenzbereich ( $Y(f) = X(f) * H(f)$ ) und umgekehrt. Diese Operation kann auf LTI-Systeme angewandt werden. Zur Berechnung des Ausgangssignals eines solchen Systems kann folglich im Zeitbereich die Impulsantwort mit dem Eingangssignal gefaltet werden oder im Frequenzbereich das transformierte Eingangssignal mit der Übertragungsfunktion

---

<sup>14</sup> Basierend auf dem Modell von Jean Baptiste Joseph Fourier (1768 – 1830).

multipliziert werden. Die schnelle Faltung benutzt letztere Möglichkeit, um Rechenzeit zu sparen. Mit Hilfe der FFT werden Eingangssignal und Impulsantwort in den Frequenzbereich transformiert und anschließend miteinander multipliziert. Durch die inverse FFT wird das Ergebnis in den Zeitbereich rücktransformiert, wodurch sich das Ausgangssignal des Systems errechnet.

Für die praktische Umsetzung ist eine Echtzeit-Anwendung von großem Vorteil. Zur Simulation der Mandoline ist für die Faltung der Impulsantwort mit dem Eingangssignal der E-Gitarre möglichst wenig Rechendauer vorteilhaft. Durch den Einsatz der FFT und schnellen Faltung, lässt sich für diese Arbeit ein Ergebnis mit möglichst geringer Latenzdauer realisieren. Da die E-Gitarre das Eingangssignal des Systems, bzw. der Faltungsoperation darstellt, wird im Folgenden auf das klangerzeugende Prinzip des Generatorinstrumentes eingegangen.

### 3 Die elektrische Gitarre als Generatorinstrument

Die (elektrische) Gitarre ist nach einer Studie der Universität Hamburg eines der beliebtesten Instrumente in Deutschland.<sup>15</sup> Ein Grund dafür sei, dass der Klang einer E-Gitarre sehr vielseitig ist, denn mit einer elektrischen Gitarre lassen sich Genres von Pop bis Metal musikalisch umsetzen. Durch Effektpedale oder Software-Plugins lässt sich der Klang des Instrumentes verzerren oder verändern, wobei die Charakteristik der Gitarre erhalten bleibt.<sup>16</sup> Für diese Untersuchung wird das Signal einer elektrischen Gitarre verwendet, um den Klang eines anderen Instrumentes zu simulieren. Der erkennbare Klang der elektrischen Gitarre soll nach der Anwendung nicht mehr als solcher identifizierbar sein. Deshalb wird im Folgenden beschrieben, wie der Klangentstehungsprozess einer elektrischen Gitarre funktioniert, um Rückschlüsse auf den Einfluss des Gitarrensignals ziehen zu können.

Ziel ist, es eine Mandoline authentisch zu simulieren, wofür die im vorherigen Kapitel beschriebene Faltung genutzt wird. Das Gitarrensingal dient als Eingang der Operation, es wird mit der Impulsantwort der Mandoline gefaltet (siehe Abbildung 5). Folglich wird die E-Gitarre auch Generatorinstrument genannt. Ähnlich wie bei der Mandoline spielen bei der Klangerzeugung der E-Gitarre komplexe und reziproke Faktoren eine Rolle, welche aufgrund von linearen Systemverhalten, Einfluss auf den Klang des Ausgangssignals nehmen.

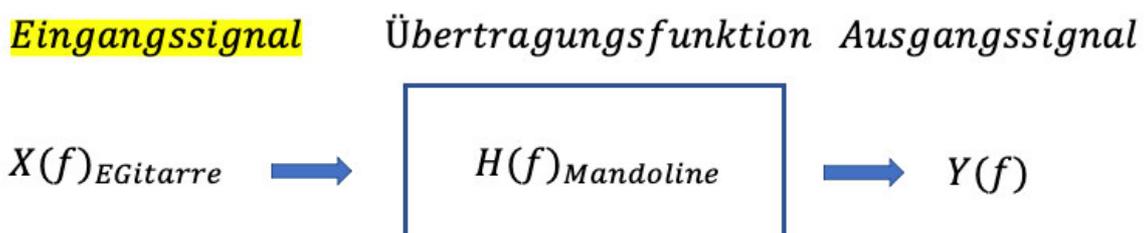


Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung der Faltungsoperation

Um ein möglichst authentisches Ausgangssignal zu erhalten, empfiehlt es sich die bauteilbedingten Klangcharakteristiken eines Generatorinstrumentes zu minimieren. Eine akustische Gitarre erzeugt starke bauteilabhängige Resonanzen<sup>17</sup>, wie die

<sup>15</sup> Vgl. (Weidenbach, 2022)

<sup>16</sup> Beispiele für die Manipulation des Gitarren-Signales seien Chorus-, Phaser-, Flanger- oder Tremolo-Effekte.

<sup>17</sup> Meist zwischen 100 – 250 Hz, vgl. (Rossing & Caldersmith, Guitars and Lutes, 2010, S. 27)

„Helmholtzresonanz“ (durch die Verstärkung des Schalldrucks über den Korpus).<sup>18</sup> Für diesen Versuch ist es wünschenswert, die Saitenschwingung der Gitarre möglichst isoliert zu erfassen. Daher wird auf eine elektrische Gitarre zurückgegriffen, deren Klangerzeugungsprinzip von der akustischen Variante abweicht.

### 3.1 Der Klangerstehungsprozess einer elektrischen Gitarre

Die Entstehung des Klanges einer elektrischen Gitarre ist ein, von mehreren Faktoren abhängiges, komplexes System. Grundsätzlich lassen für diesen Versuch drei besonders relevante Faktoren hervorheben:

1. Der Mensch: Der Energieimpuls geht zunächst vom Musizierenden aus. Dabei werden Spielart, Anschlagstärke und Tonhöhe gewählt.
2. Die Saite: Durchmesser, Material und Zugstärke wirken sich auf den Klang aus.
3. Der Tonabnehmer: Essenziell für den Klang einer E-Gitarre, je nach Position und Anzahl der Magnetspulen (Bauart).<sup>19</sup>

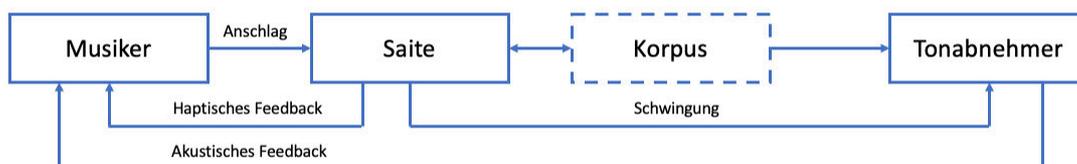


Abbildung 6: Klangerzeugung einer E-Gitarre

Anhand dieser drei Faktoren lässt sich festhalten, dass je nach Veränderung der Parameter unterschiedliche Resultate bei der Klangerzeugung entstehen. Hinzu kommt, dass die genannten Parameter miteinander gekoppelt sind und sich gegenseitig beeinflussen (reziprok). Da sich das Anspielen der Gitarre auf das ganze System auswirkt, werden

<sup>18</sup> Vgl. (Rossing & Caldersmith, Guitars and Lutes, 2010, S. 27)

<sup>19</sup> Vgl. (von Türckheim, 2013, S. 5 f.)

Veränderungen dieses Parameters im gleichen Maße den Ausgang des Systems beeinflussen (Linearität).<sup>20</sup>

Um ein möglichst authentisches Resultat zu erzielen, ist es wichtig diese Faktoren zu verstehen und bei der Erzeugung des Eingangssignals zu beachten. Der Korpus und der Hals sind weitere Elemente, die den Klang einer elektrischen Gitarre beeinflussen können. Das Mitschwingen dieser, als Reaktion auf die Anregung der Saiten, beeinflusst wiederum das Schwingverhalten der Saiten. Allerdings sei dieser Einfluss auf den Klang der elektrischen Gitarre äußerst gering.<sup>21</sup>

Zunächst wird die Energie von dem Musiker oder der Musikerin auf die Saite übertragen. Hierfür gibt es verschiedene Anspieltechniken. Die Saite kann mit den Fingern gezupft oder mit dem Plektrum angespielt werden. Je nach Härte („Attack“) und Art des Anspielens, werden unterschiedliche Obertöne angeregt. Bei der Wahl des Anschlages, sollte deswegen eine Methode gewählt werden, die dem Spielstil einer Mandoline entspricht. Auf den Klang hat auch der Ort des Anschlages eine Auswirkung. Dieser kann nahe des Stegs oder nahe des Halses erfolgen. Ebenso besitzen die Stärke des Plektrums und das Material einen Einfluss. Nachdem die Energie auf die Saite übertragen wird, beginnt diese zu schwingen und erzeugt stehende Wellen.<sup>22</sup> Es sollte dabei darauf geachtet werden, dass Material und Saitendurchmesser, denen einer Mandoline nahekommen, um die Authentizität des Ausgangssignals zu verbessern.

Der Gitarrenkorpus wird zu Eigenschwingung angeregt, da bei der Reflexion der Saitenschwingung an den Auflagepunkten (Steg und Hals) Schwingungsenergie abgegeben wird. Die Schwingung der Saite erhält dadurch eine Dämpfung, welche frequenzabhängig ist und von der Schwingungsfähigkeit des Korpus abhängt. Diese Schwingungsfähigkeit wird auch als Admittanz bezeichnet. Je höher die Admittanz in diesem Bereich ist, desto mehr Schwingungsenergie der Saiten wird absorbiert und in Luftschall umgewandelt.<sup>23</sup> Das Klangerzeugungsprinzip der elektrischen Gitarre durch einen Magnettonabnehmer auf einem soliden Korpus montiert minimiert diesen Einfluss, im Vergleich zur akustischen Gitarre.

---

<sup>20</sup> Wie in Kapitel 2 „Die Faltungsoperation – theoretische Grundlagen“ beschrieben.

<sup>21</sup> Vgl. (Rossing & Caldersmith, Guitars and Lutes, 2010, S. 37 f.)

<sup>22</sup> Vgl. (Rossing & Caldersmith, Guitars and Lutes, 2010, S. 11 ff.)

<sup>23</sup> Vgl. (Eckardt, 2015, S. 10 f.)

Schlussendlich besitzt die Wahl des Tonabnehmers einen maßgeblichen Einfluss auf den Klang des Eingangssignals und somit auch auf das Ausgangssignal der späteren Faltungsoperation. Der Tonabnehmer nimmt die Schwingungen der Saiten senkrecht zu seiner Oberfläche auf und wandelt sie in ein elektrisches Signal. Da es verschiedene Bauformen von Tonabnehmern gibt, werden diese im Folgenden erläutert. Neben der Form des Tonabnehmers spielt ebenso die Positionierung eine wichtige Rolle. Derselbe Tonabnehmer, an zwei verschiedenen Stellen auf dem Korpus montiert (z.B. Steg- und Halsposition), führt zu unterschiedlichen Klangcharakteristiken.<sup>24</sup>

Für die Erzeugung des Eingangssignales wird eine Fender Stratocaster Gitarre verwendet. Sie besitzt unter anderem einen „Humbucker“ (zwei gegengewickelte Spulen) in der Stegposition und einen „Single Coil-Pickup“ (eine Spule) in der Hals- sowie Mittelposition:

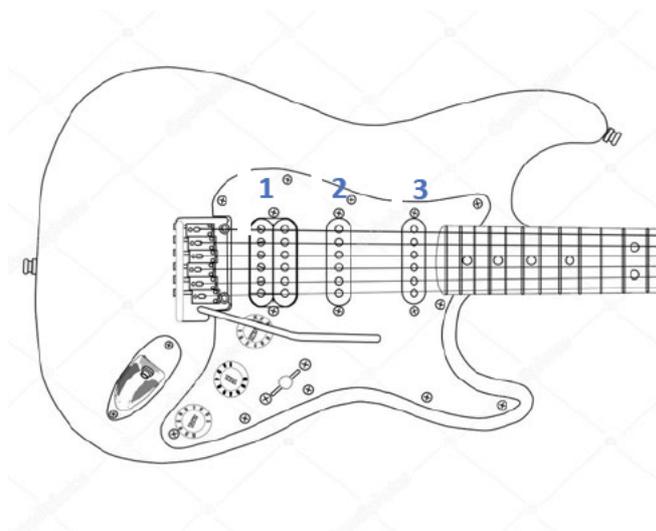


Abbildung 7: Skizze einer HSS Stratocaster, (depositphotos.com, 2022)

1. Humbucker in Stegposition
2. Single Coil in Mittelposition<sup>25</sup>
3. Single Coil in Halsposition

Bei einem Tonabnehmer handelt es sich vereinfacht um eine Spule, welche durch eine schwingende Stahlsaite angeregt wird. Das Prinzip beruht auf dem Induktionsgesetz:

---

<sup>24</sup> Vgl. (Rossing & Caldersmith, Guitars and Lutes, 2010, S. 37 ff.)

<sup>25</sup> (wird nicht betrachtet)

$U_i = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$ . Wobei  $N$  die Anzahl der Windungen der Spule beschreibt und  $\Phi$  den magnetischen Fluss.<sup>26</sup> Die Saite produziert, nachdem sie angespielt wird, ein magnetisches Wechselfeld, welches das eine elektrische Wechselspannung induziert. Diese Spannung kann im Anschluss verstärkt werden. Der Tonabnehmer (engl. „Pickup“) ist ein passiver magnetischer Wandler. Er besteht grundsätzlich aus einem Draht, welcher um einen Magneten gewickelt ist.<sup>27</sup> Der Aufbau lässt sich in einem Ersatzschaltbild vereinfacht darstellen:

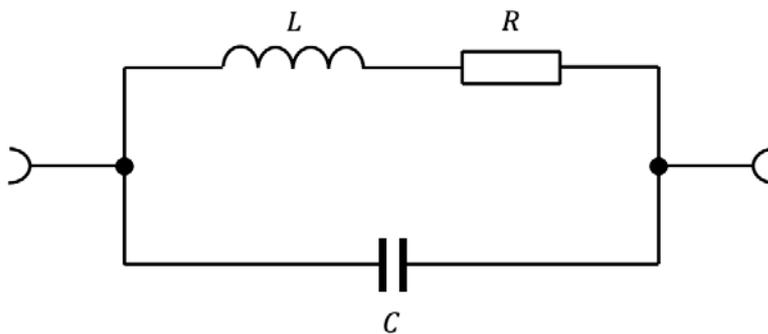


Abbildung 8: Ersatzschaltbild eines PUs, Vgl. (Curdt, 2022)

Im Folgenden werden die zwei verwendeten Tonabnehmer für die Klangerzeugung des Eingangssignals beschrieben.

### 3.1.1 Single Coil-Pickup in Halsposition

Die Bauform des Single Coil-Tonabnehmers ist eine der ältesten Formen und wird häufig bei (Fender) Stratocaster-Gitarren verwendet. Diese Gitarren werden seit den 1950er Jahren kaum verändert hergestellt und sind eine der ersten kommerziellen Elektrogitarren, welche in Serie produziert wurden. Sie besitzen in ihrer Grundform drei Single Coil-Pickups (PU), welche die sich in ihrer Positionierung unterscheiden. Ein Single Coil-PU besitzt, wie der englische Name es übersetzen lässt, eine einzelne Spule. Um alle sechs Saiten einer Gitarre hörbar zu machen, muss jede Saite einem starken Magnetfeld ausgesetzt werden. Dazu werden im Abstand von ca. einem Zentimeter (entspricht dem Saitenabstand am Steg) sechs parallel angeordnete zylinderförmige Dauermagnete verwendet. Ihr Durchmesser beträgt ca. fünf

<sup>26</sup> Vgl. (Curdt, 2022)

<sup>27</sup> Vgl. (Zollner, 2009) Kap. 5 Magnettonabnehmer

Millimeter bei einem Zentimeter Länge. Sie sind gleichpolig orientiert und werden in den Spulenträger gesteckt und wenige Millimeter unter den Saiten angebracht (Zollner, 2009):

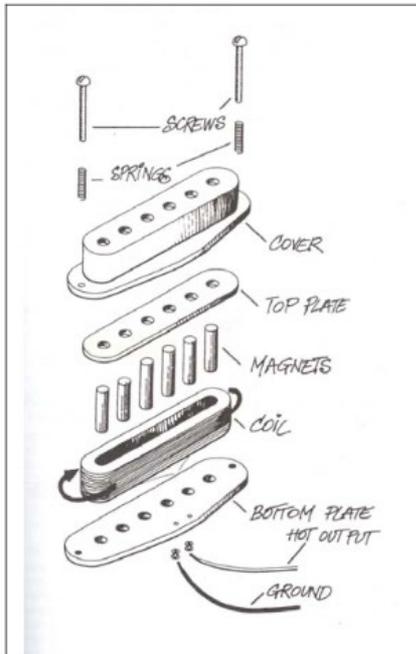


Abbildung 9: Aufbau eines Single Coil-PU, links (Zollner, 2009)

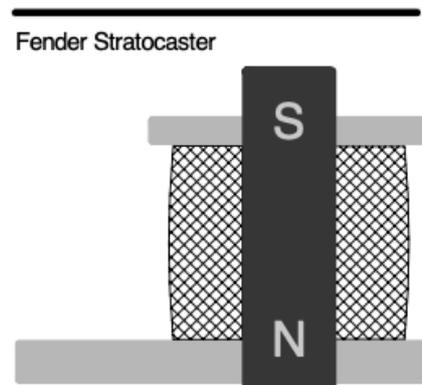


Abbildung 10: Querschnitt eines SC-PU, rechts (Zollner, 2009)

Neben dem Aufbau des Tonabnehmers ist die Positionierung des PUs entscheidend für die Klangcharakteristik (Timbre). Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Steg- im Vergleich zur Halsposition einen höhen-lastigeren, „bissigeren“ Charakter besitzt, da dort gewisse Obertonschwingungen besser abgenommen werden. In der Halsposition besitzen einige höhere (Ober-)Töne sogenannte Schwingungsknoten, weswegen diese Obertöne nicht erklingen. Die Halsposition gibt das Signal Bass-lastiger wieder.<sup>28</sup> Die Position des PUs hat folglich entscheidenden Einfluss auf den Klang, da bestimmte Oberton-Frequenzen bevorzugt oder ausgeblendet werden. Weil sich beim Anschlag von einer Saite stehende Wellen bilden, entstehen die genannten Bewegungsbäuche und -knoten. Ist die Position des Tonabnehmers auf der Höhe eines Knotenpunktes, entspricht für bestimmte (Ober-)Töne die Amplitude ( $A$ ) der Welle den Wert Null. Dadurch werden in der Halsposition des PUs Obertöne nicht erfasst ( $A = 0$ ), welche bei der Stegposition abgenommen werden  $A \neq 0$  (und andersrum).<sup>29</sup>

<sup>28</sup> Vgl. (Rossing & Caldersmith, Guitars and Lutes, 2010, S. 37 f.)

<sup>29</sup> Vgl. (Curdts, 2022)

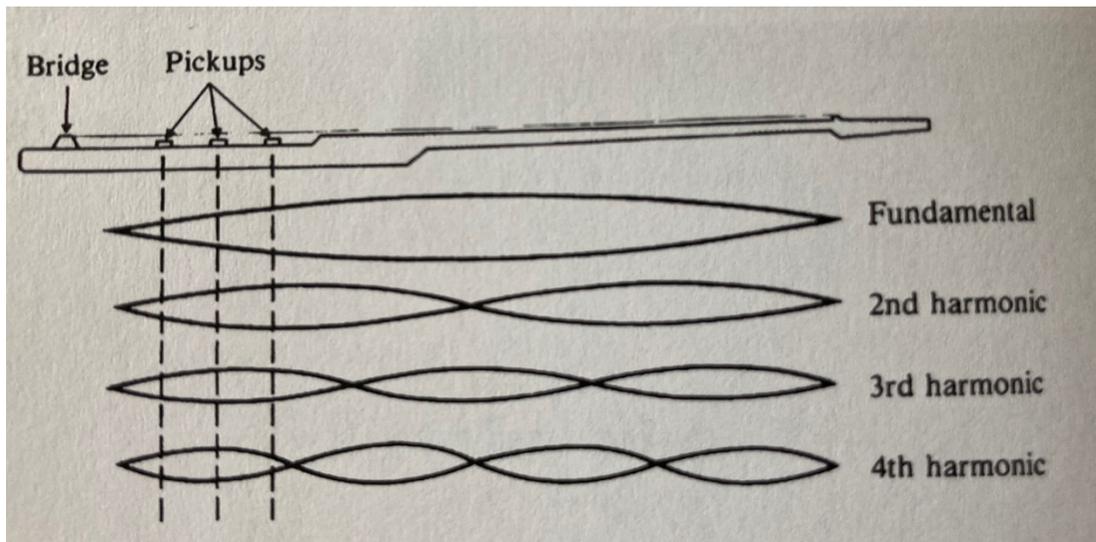


Abbildung 11: Knotenpunkte der ersten vier Harmonischen einer Gitarre, (Rossing & Caldersmith, *Guitars and Lutes*, 2010)

Diese klangliche Differenz ist für den Versuch entscheidend, da untersucht werden soll, welche PU-Position das authentischere Ausgangssignal nach der Faltungsoperation erzeugt. Erschwert wird dieser Vergleich durch den Umstand, dass das Generatorinstrument in der Stegposition einen Humbucker-Tonabnehmer besitzt, dessen Funktionsweise sich vom Single Coil unterscheidet.

### 3.1.2 Humbucker in Stegposition

Ein Single Coil-PU besitzt klangliche Eigenschaften, welche von vielen Gitarristen geschätzt werden. Dennoch ist die Bauform nicht störungsfrei, weswegen die Motivation zur Entwicklung des Humbuckers entstand. Single Coils wandeln nicht nur die Saitenschwingungen in elektrische Spannungen um, sondern auch störende Faktoren wie Magnetfelder, welche von Transformatoren, Leuchtstofflampen oder Netzkabeln ausgestrahlt werden können. Der Humbucker (deutsch: Brumm-Unterdrücker) besitzt zwei Spulen, die gegenphasig zu einem Dipol geschaltet sind. Von externen Störquellen induzierte Magnetfelder erzeugen in jeder der zwei Spulen die gleiche Spannung (das „Brummen“). Diese heben sich wegen der gegenphasigen Zusammenschaltung der beiden Spulen auf. Würde das vom Dauermagnet erzeugte Feld, beide Spulen mit gleicher Polarität durchfließen, wäre das von der schwingenden Saite erzeugte Eingangssignal ebenso kompensiert. Deshalb fließt das magnetische Feld durch die beiden Spulen antiparallel, sodass die von der Saitenbewegung induzierte Wechselspannung gegenphasig ist. Da auch die Zusammenschaltung der beiden

Spulen gegenphasig ist, werden die Nutzspannungen zweimal um 180° phasengedreht, also gleichphasig überlagert. Damit lässt sich der Signal-zu-Rausch-Abstand (SNR) im Vergleich zum Single Coil verbessern (Zollner, 2009).

Single Coil- und Humbucker-Tonabnehmer unterscheiden sich nicht allein im Maß der Rauschunterdrückung: der mechanische Aufbau ergibt bauteilbedingt verschiedene Übertragungsfunktionen. Die Tonabnehmer weichen nicht nur in der Anzahl ihrer Spulen ab, sondern auch in deren Induktivität, Resonanzfrequenz und -dämpfung (Abbildung 12 und Abbildung 13 skizzieren den Aufbau eines Humbuckers). Sie besitzen dadurch einen unterschiedlichen Klang. Single Coils seien leiser, jedoch höhenbetonter, während Humbucker lauter (höhere Spannungsinduktion), aber höhenärmer seien. Dies lässt sich allerdings schwer verallgemeinern, da verwendete Bauteile und Komponenten ebenso eine Rolle spielen.<sup>30</sup>

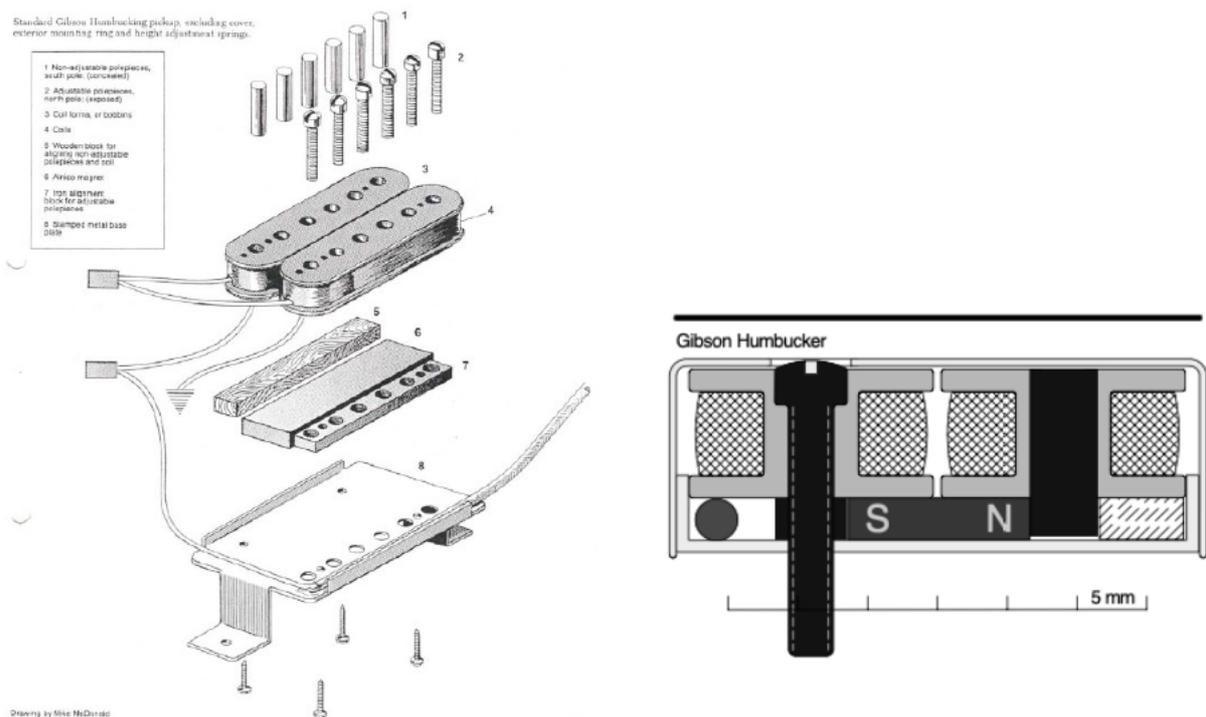


Abbildung 12: Aufbau eines Humbuckers nach Mike McDonald, links (Zollner, 2009)

Abbildung 13: Querschnitt eines Gibson Humbuckers, rechts (Zollner, 2009)

<sup>30</sup> Vgl. (Zollner, 2009) Kap. 5.2

Grundsätzlich besitzen Humbucker eine höhere Induktivität und Spannung, dadurch entsteht eine niedrigere Resonanzfrequenz und hohe Frequenzanteile werden reduziert.<sup>31</sup> Da im verwendeten Generatorinstrument der Humbucker in der Stegposition verbaut ist, könnte sich dies „ausgleichen“, weil in der Stegposition höhere Obertöne lauter abgenommen werden. Eine Mandoline besitzt ein höheres Register als eine Gitarre<sup>32</sup>, weswegen sich hochfrequente Anteile im Signal positiv auf die Authentizität der Klangsynthese auswirken können. Welcher der beiden Tonabnehmer sich besser eignet, wird der auditive Test der Ergebnisse der Faltungsoperation zeigen.

### 3.2 Die Gitarre als lineares, zeitinvariantes System

Im vorherigen Kapitel wurden drei hauptsächliche Faktoren diskutiert, welche Einfluss auf den Klang der Signalerzeugung nehmen. Da die elektrische Gitarre ein sehr komplexes System ist, auf das viele reziproke Faktoren Einfluss nehmen, kann für eine vereinfachte Betrachtungsweise das Generatorinstrument als LTI-System betrachtet werden.

Bei der Annahme, dass es sich bei einer elektrischen Gitarre um ein LTI-System handelt, müssen, wie in Kapitel 2.1 diskutiert, zwei Anforderungen erfüllt werden:

1. Linearität: Die Antwort des Systems auf die Summe zweier Signale ist die Summe der beiden Systemantworten (Superpositionsprinzip).
2. Zeitinvarianz: Bei zeitlicher Verschiebung des Eingangssignals, wird die Systemantwort ebenfalls verschoben.

Saiten-Instrumente wie die Gitarre können, obwohl Systeme in der Realität nie vollumfänglich linear und zeitinvariant sind, als LTI-Systeme betrachtet werden.<sup>33</sup>

Zunächst wird der Anschlag der Saite einer Gitarre als Anregung des Systems betrachtet. Diese Anregung bringt die Saite zum Schwingen, was wiederum eine Spannung im Tonabnehmer-System induziert. Das entstandene elektrische Signal kann als Antwort auf ein angeregtes System gemessen werden. LTI-Systeme können auf kleinere Teilsystem heruntergebrochen

---

<sup>31</sup> Vgl. (Curdt, 2022)

<sup>32</sup> Siehe dazu Kapitel 4.1: Aufbau und Eigenschaften der Mandoline

<sup>33</sup> Vgl. (Görne, 2015, S. 136 f.)

werden. In der Ausgangsbetrachtung des Versuches ist das entstandene Ausgangssignal der Gitarre das Eingangssignal der Anregung der Faltungsoperation mit der Impulsantwort der Mandoline.

Da folglich das Ausgangssignal des Generatorinstrumentes aus Teilsystemen besteht, kann dieses besser beschrieben werden, indem die einzelnen Teilsysteme berücksichtigt werden. Mit der Übertragungsfunktion  $H(f)$  kann in der spektralen Darstellungsweise das Ausgangssignal  $Y(f)$  durch Multiplikation von frequenzabhängigen Funktionen errechnet werden:  $Y(f) = X(f) * H(f)^{34}$ , wobei  $X(f)$  die Anregung des Systems durch den Anschlag der Saite darstellt (vgl. Abbildung 14). Maßgeblich für den Einfluss des Klages der Generatorgitarre sind der Tonabnehmer sowie die Saiten selbst. Wenn diese als Teilsysteme betrachtet werden ergibt sich folgendes LTI-System:



Abbildung 14: Vereinfachtes Blockschaltbild einer E-Gitarre

Da aufgrund harmonischer Schwingungsknoten und -bäuche die Position der Tonabnehmer eine Rolle spielt, muss dieser Einfluss ebenso Teil der Betrachtungsweise sein. Bestimmte Grund- bzw. Obertöne werden an bestimmten Positionen gar nicht oder mit geringer Amplitude wiedergegeben (vgl. Abbildung 11). Die entstehenden Kammfilter-Effekte, sollten in der systematischen Betrachtung berücksichtigt werden.

Kammfilter entstehen nicht nur durch die Position des Tonabnehmers, sondern auch durch die Position des Anschlages mit dem Plektrum, Damit ergibt sich folgende Gleichung für das System der Gitarre:

$$Y(f) = X(f) * H(f)_{saite} * H(f)_{Anschlag} * H(f)_{PU} * H(f)_{PUPos}^{35}$$

<sup>34</sup> Vgl. (Kammeyer & Kroschel, 2012, S. 13)

<sup>35</sup> Vgl. (Eckardt, 2015, S. 14)

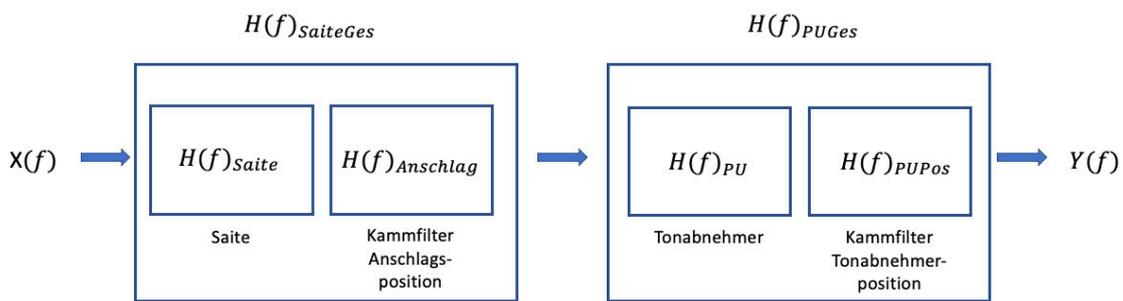


Abbildung 15: Erweitertes Blockschaltbild des Übertragungsverhaltens einer E-Gitarre

Durch diese Darstellungsform (siehe Abbildung 15) lässt sich das System des Generatorinstrumentes vereinfacht aufzeigen und einzelne Einflussfaktoren können isoliert betrachtet werden.

Eine Möglichkeit zur Vermeidung des Einflusses des magnetischen Tonabnehmers<sup>36</sup> sei die Verwendung eines piezoelektrischen Tonabnehmers. Die Wandlung der Saitenschwingung geschieht bei „Piezos“ nicht über eine magnetisch induzierte Spannung, sondern über eine mechanische Verformung des piezoelektrischen Wandlers, der Ladungen freisetzt. Dadurch werden mit der Anlegung eines „Piezo-PU“ unter der Stegeinlage der Saiten die Schwingung der Saiten isoliert abgegriffen. Die Wirkweise des piezoelektrischen-Effektes erzeugt einen Klang, welcher sich von magnetischen Tonabnehmern unterscheidet.<sup>37</sup> Ob dieser Klang für das virtuelle Instrument bessere Ergebnisse erzielt, kann allerdings nicht pauschal beantwortet werden. Im Anhang befindet sich ein Ausgangssignal<sup>38</sup>, welches mit dem Eingangssignal *xt\_Chords\_Piezo.wav* gefaltet wurde.<sup>39</sup> Das Eingangssignal wurde mit der Ibanez-Gitarre erzeugt, welche über ein piezoelektrisches Tonabnehmer-System verfügt. Das Faltungsergebnis kann klanglich nicht überzeugen. Da die akustische Ibanez-Gitarre kein hochwertiges Instrument ist und sich die Bauform von der Generatorgitarre unterscheidet, erschwert dies einen Vergleich.

<sup>36</sup> Ausgedrückt mit der Übertragungsfunktion  $H(f)_{PUGes}$

<sup>37</sup> Vgl. (Görne, 2015, S. 262 f.)

<sup>38</sup> Vgl. *yt\_Mando\_S1xChords\_Piezo.wav*

<sup>39</sup> Die Faltungsoperation wird in Kapitel 6 behandelt.

Als eine Möglichkeit zur Optimierung des Eingangssignal sei die Entzerrung der Generatorgitarre genannt. Dafür müsste das Übertragungsverhalten des Tonabnehmers ermittelt (bspw. mit dem Sinus-Sweep-Verfahren) und am Ausgang des Systems „herausgerechnet“ werden. Dies könne durch eine Multiplikation der invertierten Übertragungsfunktion  $H(f)_{PU}^{-1}$  mit der Ausgangsfunktion  $Y(f)$  im spektralen Bereich geschehen. Zusätzlich kann der bauforn-bedingte Einfluss der Gitarre ermittelt und ebenso herausgerechnet werden. Schlussendlich ist jedoch in Abbildung 15 der Einfluss des Gitarrenkorpus auf die Klangerzeugung nicht inkludiert, da dieser folgend nicht betrachtet wird.

## 4 Die Mandoline als übertragendes System

Der Ansatz, den Klang einer Mandoline durch das Spielen einer E-Gitarre zu simulieren, wirft die Frage auf, wie sich die klanglichen Eigenschaften der Mandoline messen lassen. Da im vorherigen Kapitel erörtert wurde, dass die elektrische Gitarre ein lineares, zeitinvariantes System ist, dessen Eigenschaften sich mit einer Übertragungsfunktion beschreiben lassen, wird davon ausgegangen, dass dies bei einer Mandoline ebenso möglich ist (vgl. Abbildung 16). Somit lässt sich die Impulsantwort des Instrumentes messen und die Übertragungsfunktion mittels Fourier-Transformation errechnen.

Zunächst wird auf den Aufbau der Mandoline eingegangen und ihre Eigenschaften sowie Gemeinsamkeiten und Unterschiede zum Generatorinstrument werden verglichen. Es wird eine Methode zur Messung der Impulsantwort vorgestellt und diskutiert. Diese Methode wird in einem Versuch praktisch umgesetzt und die gemessenen Ergebnisse in den Gesamtkontext der Untersuchung eingeordnet.

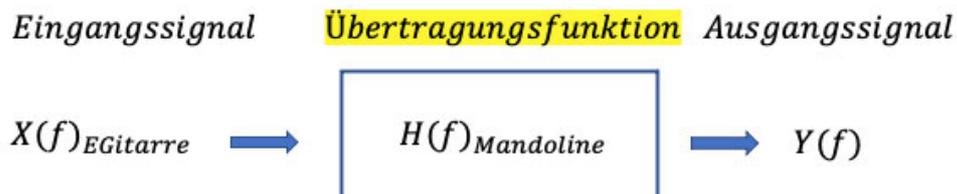


Abbildung 16: Vereinfachte Darstellung der Faltungsoperation

### 4.1 Aufbau und Eigenschaften der Mandoline

Eine Mandoline besitzt im Gegensatz zur elektrischen Gitarre eine rein akustische Klangerzeugung. Sie besteht aus einem hölzernen Korpus und ist mit acht Saiten bespannt, wobei die Saiten in Paaren auftreten. Im Gegensatz zur klassischen oder elektrischen Gitarre ist sie standardmäßig in Quinten gestimmt. Die gebräuchlichste Stimmung einer Mandoline ist G3-D4-A4-E5.<sup>40</sup> Sie besitzt wie die elektrische Gitarre Stahlsaiten, dagegen unterscheiden sie sich teilweise im Durchmesser und aufgrund der verschiedenen Korpus- und Halsgrößen in der

---

<sup>40</sup> Da vier Saiten-Paare vorhanden sind eigentlich: GG-DD-AA-EE.

Länge.<sup>41</sup> Ein handelsübliches Set<sup>42</sup> von Mandolinen-Saiten hat eine „Stärke“ von 0,011 – 0,04 Zoll.<sup>43</sup> Dies entspricht einem Durchmesser von 0,279 mm – 1,016 mm.

Die (elektrische) Gitarre ist standardmäßig im Quartabstand gestimmt: E2-A2-D3-G3-B3-E4<sup>44</sup>, wobei zwischen der G- und B-Saite eine große Terz liegt (vier Halbtonschritte).<sup>45</sup> Die tonal höchste Saite der Gitarre (E4) besitzt den Frequenzabstand von einer Oktave (halber Frequenzwert) zur höchsten Saite der Mandoline (E5).

Die Saitenstärke von elektrischen Gitarren hängt, wie bei allen Saiten-Instrumenten, von der Stimmung sowie der Halsmensur ab. Auch hier gibt es verschiedene „Sets“, wobei ein durchschnittliches Set Saitendurchmesser von 0,254 mm – 1,1684 mm besitzt.<sup>46</sup>

Da beide Instrumente mit ähnlichen Saitenstärken bespannt werden, empfiehlt es sich für eine authentische Simulation, Saiten für die elektrische Gitarre zu wählen, welche denselben Durchmesser besitzen, wie die Saiten einer gebräuchlichen Mandoline. Zur weiteren Optimierung werden die vier tonal-höchsten Saiten der Gitarre auf die Grundstimmung der Mandoline gestimmt. Mit einem Kapodaster lässt sich zudem die Tonhöhe der Gitarre anpassen, um das Register einer Mandoline zu erreichen.

Zur weiteren Optimierung könnte eine 12-saitige Gitarre benutzt werden, welche wie die Mandoline Saitenpaare besitzt (sechs statt vier). Allerdings liegt diese für den Versuch nicht vor. Somit lässt sich diese besondere Klang-Charakteristik der Mandoline, bedingt durch vier Saiten-Paaren, nicht umsetzen. Jedoch sind nicht nur die Saiten-Paare, welche einen dezenten Chorus-Effekt erzeugen, von klanglicher Bedeutung, sondern ebenso der schallformende und -abstrahlende Korpus (siehe Abbildung 17).

---

<sup>41</sup> Vgl. (Rossing & Cohen, Mandolin Family Instruments, 2010, S. 77)

<sup>42</sup> Bspw. Saiten von „Elixir: Nanoweb Mandoline Medium“ mit Stärken von: 0,011-0,015-0,026-0,040 Zoll.

<sup>43</sup> Vgl. (Thomann GmbH, 2022)

<sup>44</sup> Für Notennamen wird die englische Notation gewählt. Das deutsche „h“ entspricht dem englischen „b“.

<sup>45</sup> Vgl. (Rossing & Caldersmith, Guitars and Lutes, 2010, S. 20)

<sup>46</sup> Bspw. von „Ernie Ball: 2221 Regular Slinky“ mit Stärke: 0,010-0,013-0,017-0,026-0,036-0,046 Zoll.

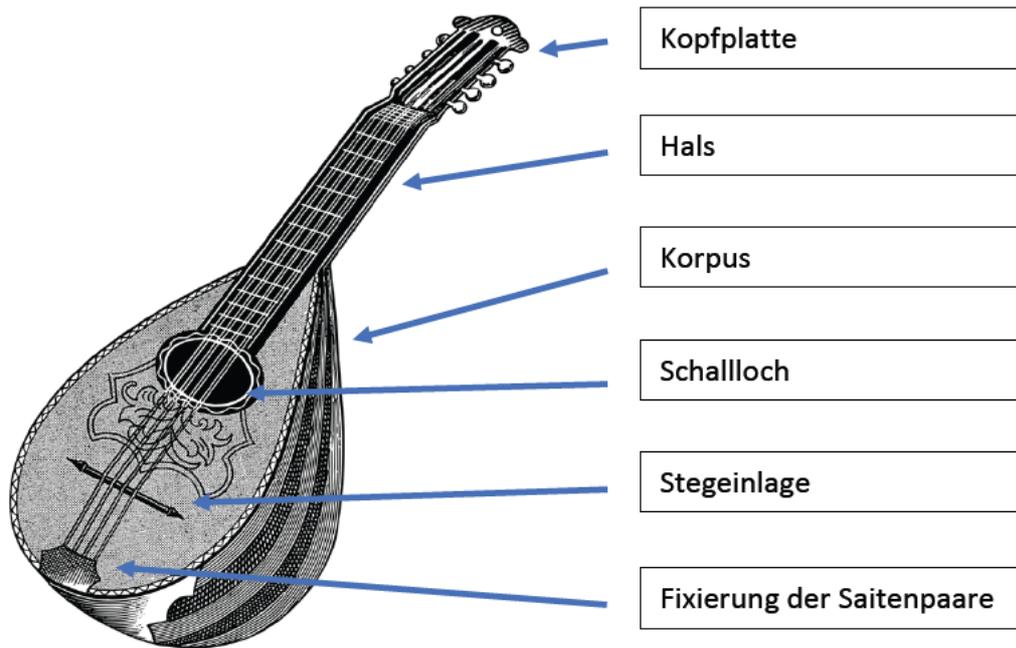


Abbildung 17: Skizze einer Mandoline, (Pixabay, 2022)

Die Aufgabe des Korpus ist es die Energie der Saite der Mandoline in akustische Abstrahlung zu übersetzen. Zudem wird die charakteristische Färbung des Klanges addiert. Ein Korpus funktioniert somit näherungsweise wie ein lineares Filter höherer Ordnung, welches die Saitenschwingungen in Abhängigkeit der Frequenz dämpft.<sup>47</sup> Um dieses Übertragungsverhalten der Mandoline zu erfassen, ist die Messung der Impulsantwort des Instrumentes notwendig. Zur Erzeugung eines solchen Impulses und zur Messung der Antwort des Systems, wird im Folgenden eine Methode der praktischen Anwendung vorgestellt.

#### 4.2 Messung des Übertragungsverhaltens

Um ein System durch dessen Übertragungsverhalten beschreiben zu können, muss ein zeitlich infinitesimal-kleiner Stoß genutzt werden, der eine Systemantwort zu provoziert.<sup>48</sup> Da LTI-Systeme eine idealisierte (System-)Form darstellen, ist in der Theorie zur Bestimmung einer exakten Impulsantwort ein unendlich kurzer Impuls zur Anregung notwendig. Ein entsprechender Dirac-Stoß  $\delta(t)$  ist praktisch nicht umsetzbar. Gleichwohl ist näherungsweise eine genaue Bestimmung des Übertragungsverhaltens eines Systems mittels technisch

<sup>47</sup> Vgl. (von Türckheim, 2013, S. 31)

<sup>48</sup> Wie in Kapitel 2.2 erörtert.

erzeugter Impulse möglich (Görne, 2015, S. 139). Hierfür gibt es verschiedene Messmethoden. An die Wahl einer geeigneten Methode sind wissenschaftliche Anforderungen zu stellen.

#### 4.2.1 Anforderungen an die Messmethode

Reproduzierbarkeit und Validität sind Voraussetzungen, welche erfüllt werden müssen, um geeignete Ergebnisse einer wissenschaftlichen Arbeit zu erhalten. Die Messmethode zur Ermittlung der Impulsantwort sollte bei weiteren Instrumenten zum Vergleich der Ergebnisse reproduzierbar sein. Zudem müsse die Validität der Methode gewährleistet werden, indem der Ort der Kraftanregung sowie die Abnahme des Schwingungsverhaltens der Mandoline definiert sind. Zusätzlich beeinflusst der Ort der Aufhängung der Mandoline die Resonanz des Instrumentes. Dieser sollte so gewählt werden, dass die Schwingung des Korpus authentisch zu einer Spielsituation bleibt. Die Saiten der Mandoline werden im „Standard-Tuning“ gestimmt, um die statischen Kräfteverhältnisse durch die Zugspannung nicht zu verändern. Sie müssen trotzdem abgedämpft werden, da allein das Übertragungsverhalten bedeutsam ist. Ein leistungsstarker Impuls mit möglichst breitbandiger Anregung ist notwendig, um das System optimal anzuregen. Ein etabliertes Verfahren hierzu ist die Anregung mit der Impulshammer-Methode, die in dieser Untersuchung verwendet wird.<sup>49</sup>

#### 4.2.2 Die Impulshammer-Methode

Mit Hilfe der Impulshammer-Methode lässt sich das Übertragungsverhalten eines Körpers oder einer Struktur bestimmen. Die Impulserzeugung eines physischen Hammers liefert schnelle und näherungsweise ideale Ergebnisse. Es lässt sich ein breites Spektrum messen, da die Impulserzeugung von zeitlich geringer Dauer ist:  $t \rightarrow 0 \text{ s}$ .

Der Hammer besitzt einen piezoelektrischen „Kraftaufnehmer“ auf dessen Schlagspitze. Mit ihm lässt sich die anregende Kraft  $F$  messen. Der abgestrahlte Schalldruck  $p$  wird über einen Miniatur-Beschleunigungssensor sowie ein Messmikrofon gemessen. Der Ort der Anregung ist ebenso entscheidend wie die Aufstellung des Mikrofons und des Sensors. Eine Veränderung der Mikrofonposition sowie eine differente Anschlagsstärke führen zu unterschiedlichen

---

<sup>49</sup> Vgl. (von Türckheim, 2013, S. 37 f.)

Ergebnissen. Somit müssen die Ergebnisse der Methode als Versuch einer Näherung betrachtet werden.<sup>50</sup>

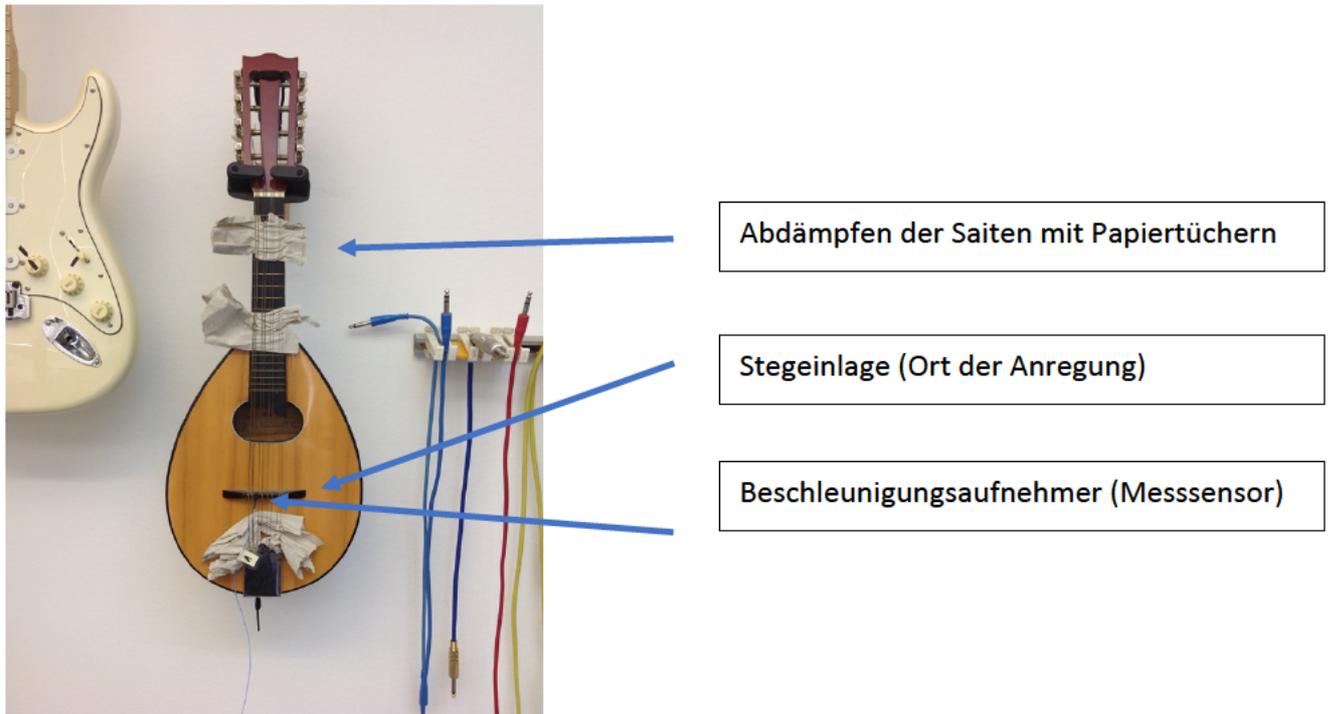


Abbildung 18: Neapolitanische Mandoline zur Vermessung

Der Hammer sollte einen Impuls an der Stegeinlage anregen, da dieses Bauteil am nächsten mit den Saiten der Mandoline verknüpft ist (Saite – Steg – Korpus). Die Saite bringt den Steg und dadurch die Holzdecke und den Korpus der Mandoline zum Schwingen. Diese Schwingungen werden vom Messmikrofon bzw. -sensor aufgenommen. Die erzeugte Impulsantwort dient außerdem zur Faltung mit dem Eingangssignal der elektrischen Gitarre. Ein Nachteil der Methode ist die geringe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, da das System manuell mit einem Hammerschlag angeregt wird. Zudem löst eine Anregung durch den Hammer lediglich eine Rotation des Stegs in X-Richtung aus.<sup>51</sup>

Genannt sei, dass bei einer anderen Messmethode, der Drahtmethode, durch das Reißen eines Drahtes an einer Saite, ein Impuls erzeugt wird, welcher zusätzlich den Steg in Längsrichtung (Y) anregt. Mit gleicher Drahtstärke seien die Ergebnisse leichter zu reproduzieren.<sup>52</sup> Ein Vergleich verschiedener Messmethoden sei daher interessant, um beide Verfahren bewerten zu können.

---

<sup>50</sup> Vgl. (von Türckheim, 2013, S. 39 f.)

<sup>51</sup> Vgl. (Möser & Feldmann, 2010, S. 493 ff.)

<sup>52</sup> (von Türckheim, 2013, S. 44 f.)

## 5 Praktische Umsetzung der Messung

### 5.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Zur Umsetzung der Impulshammer-Methode wird, neben den zu vermessenden Instrumenten und dem Impulshammer, weiteres Equipment benötigt. Zur Aufnahme der Systemreaktion werden ein mit Phantomspeisung betriebenes Messmikrofon, ein Messsensor (Beschleunigungsaufnehmer), ein Audiointerface, Recording Software und diverse Kabel zur Signalübertragung verwendet. Für die Energieversorgung des Hammers und des Sensors ist zusätzlich ein „Power Supply/Coupler“ notwendig, welcher die Signale koppelt. Folgende Technik kommt zum Einsatz:

- Impulshammer; Marke: Dytran, Modell: 5800SL
- Beschleunigungsaufnehmer; Marke: Kistler, Modell: 8778A500
- Messmikrofon; Marke: DPA, Modell: 6060 Subminiature Lavalier
- Power Supply/Coupler; Marke Kistler, Modell: 5134
- Interface; Marke Roland, Modell: Quad-Capture 2x2
- Digital Audio Workstation: Logic Pro X, Version 10.7.1
- Hardware: Apple MacBook Air 2015; macOS Monterey, Version 12.1

Messmikrofon und Beschleunigungsaufnehmer können aufgrund der begrenzten Anzahl von Eingängen des Interfaces nicht zeitgleich verwendet werden, weswegen der Versuch wiederholt werden muss. Weil sich die Ergebnisse dadurch nicht exakt replizieren lassen, wird empfohlen für Messungen mit Messsensor und -mikrofon ein Interface zu nutzen, welches genügend Eingänge bereitstellt. Für einen Vergleich der Nutzbarkeit beider Messmethoden lassen sich trotz Wiederholung des Versuches zufriedenstellende Resultate erzielen.

Die zu vermessenden Instrumente werden auf eine Aufhängung gebracht, welche sie zwischen Kopf und Hals fixiert. Abgesehen von der Aufhängung schweben sie frei in einem Abstand von 15 *cm* zur Wand. Die Saiten der Mandoline und Gitarre werden mit Papiertüchern an mehreren Stellen des Halses gedämpft, sodass sie nicht schwingen können. Es soll lediglich das Übertragungsverhalten des Instrumentes erfasst werden.

Impulshammer und Beschleunigungsaufnehmer werden über den „Power Supply“ mit Spannung versorgt und die erzeugten Signale werden an das Audio-Interface weitergegeben.

Das Interface verstärkt das Signal zusätzlich über den Gain-Regler. Im Anschluss wandelt es die analogen Signale in digitale, welche von der DAW als Eingänge erkannt und aufgenommen werden. Bei der Vorverstärkung über das Interface ist darauf zu achten, Übersteuerung zu vermeiden, weswegen „Headroom“ gewährleistet sein sollte. Nun kann über den Impulshammer eine Anregung der Stegeinlage erfolgen, welche über den Kraftsensor des Hammers sowie über den Messsensor erfasst und aufgenommen wird. Dadurch werden Kraftanregung und Übertragungsverhalten des Instrumentes aufgezeichnet (s. Abbildung 19).

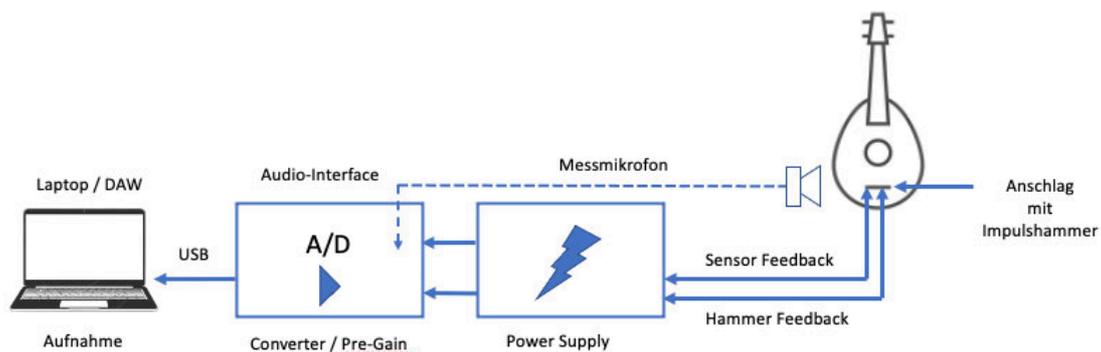


Abbildung 19: Blockschaltbild Messung der Impulsantwort

Der Versuch wird darauf mit einem Messmikrofon wiederholt, welches an die Stelle des Sensors tritt. Das Mikrofon wird direkt über das Interface mit einer 48 V Phantom-Speisung versorgt. An einem Stativ befestigt, befindet es sich in einem Abstand von ca. 30 cm vor dem Instrument und ist auf die Stegeinlage gerichtet. Im Vergleich zur Messung mit dem Beschleunigungsaufnehmer ist zu beachten, dass das Mikrofon durch Reflexionen Raumanteile aufnimmt.

Das Ergebnis wird beeinflusst vom Abstand des Instrumentes zur Wand<sup>53</sup>, vom Abstand des Instrumentes zum Mikrofon sowie der Ausrichtung des Mikrofons. Eine alleinige Ausrichtung auf die Stegeinlage führt zu keiner vollumfänglichen Aufnahme der Impulsantwort, weswegen für weitere Untersuchungsmöglichkeiten der Ort der Schalldruckaufnahme geändert und verglichen werden kann. Unterschiedliche Positionen des Messmikrofons führen zu unterschiedlichen Übertragungsfunktionen, da verschiedene Resonanzen und Moden an verschiedenen Stellen des Korpus entstehen, vgl. (Rossing & Caldersmith, Guitars and Lutes,

<sup>53</sup> Es können bei einigen Frequenzen, in Abhängigkeit es Abstandes, Kammfilter-Effekte auftreten.

2010, S. 19-33). Da ein ausgewogenes Spektraldichtebild erzeugt werden soll, wird zunächst der Beschleunigungssensor verwendet.

Der Versuch wird mit einer neapolitanischen Mandoline durchgeführt (Marke unbekannt) sowie mit einer *Hofer* Westerngitarre zur Vergleichbarkeit (Modell: HA-JC07).

## 5.2 Diskussion der Ergebnisse

### 5.2.1 Vorabuntersuchung und Relevanz für das Ergebnis

Für die Auswertung der aufgenommenen Impulsantworten wurden zur Vergleichbarkeit mehrere Instrumente analysiert. Neben der bereits erwähnten Mandoline und Western-Gitarre, wurde in einem Vorversuch eine weitere Western-Gitarre mit einem Impulshammer angeregt und mit einem Messmikrofon die Impulsantwort erfasst (vgl. Abbildung 20). Mit diesem vorangegangenen Versuch konnte bereits die Faltungsoption in MATLAB durchgeführt werden. Für die hauptsächliche Untersuchung der Mandoline wurden wichtige Erkenntnisse gesammelt. Der Vorversuch wurde mit einem günstigen Gitarren-Modell der Marke *Ibanez* (Modell: V72-ECE) durchgeführt. Da die Faltungsergebnisse der virtuellen Ibanez-Gitarre klanglich wenig überzeugend sind (vgl. *yt\_Ibanez\_M1xChords\_NPU.wav*), wird für die weitere Arbeit zusätzlich eine hochwertigere Gitarre der Marke *Hofer* betrachtet.

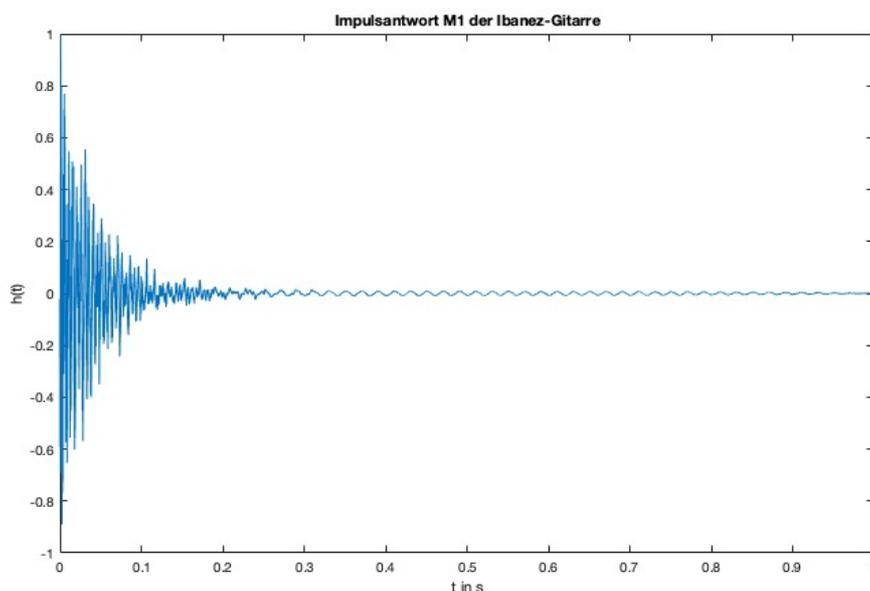


Abbildung 20: Normierte Impulsantwort der Ibanez-Gitarre

Zunächst lässt sich festhalten, dass die Messung leicht und wenig zeitintensiv durchgeführt werden kann. Dies spricht für die einfache Umsetzbarkeit der Impulshammer-Methode. Es fällt dabei auf, dass sich die Ergebnisse der Methode schwer reproduzieren lassen. Jeder Anschlag mit dem Impulshammer trifft die Steigeinlage des Instrumentes mit einer differenten Stärke sowie in unterschiedlicher Position und Winkel. Dies lässt sich auf die menschliche Komponente des Versuches zurückführen. Zur Minimierung des Einflusses dieses Parameters, könnte mit einer mechanischen Vorrichtung die Anregung erzeugt werden, um eine gleichmäßige Kraft und Position zu gewährleisten.

Ein weiterer Einflussfaktor stellt der Impulshammer selbst dar. Material, Gewicht und Anregungsfläche nehmen Einfluss auf den Anschlag und somit auf die Impulsantwort. Im Vorversuch ließ sich bereits wahrnehmen, dass die aufgenommenen Impulsantworten keine exakte klangliche Übereinstimmung aufweisen.<sup>54</sup> Dies lässt sich auf die genannten Faktoren zurückführen. Hinzu kommt, dass die Position des Messmikrofons ebenso entscheidend für die Klangaufnahme ist, denn Abstand und Ausrichtung im Raum nehmen zusätzlichen Einfluss auf das Ergebnis. Dies liegt daran, dass (wie bereits erläutert) bei einer Gitarre oder Mandoline unterschiedliche Moden an bestimmten Stellen des Korpus entstehen. Diese werden je nach Position des Mikrofons mit verschiedener Stärke aufgenommen. Bestimmte Resonanzen, welche Teil des Gesamtklangbildes des Korpus sind, werden daher weniger gut oder nur durch Raumreflexionen erfasst. Dadurch ließe sich kein ausgewogenes Spektraldichtebild des Instrumentes festhalten.<sup>55</sup> Einfluss auf das Schwingungsverhalten des angeregten Instrumentes nehmen außerdem die Aufhängung, die Positionierung im Raum sowie Schallreflexionen.

Durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalles von etwa  $343 \text{ m/s}$ <sup>56</sup> nimmt das Mikrofon, in Abhängigkeit vom Abstand zum Ort der Systemanregung, Reflexionen im Verhältnis zum Direktschall mit Verzögerung auf. Aufgrund von Laufzeitunterschieden des Schalls entstehen Überlagerungen von Wellen, welche Kammfilter-Effekte hervorrufen. Diese entstehen durch Phasenverschiebung, worauf sich Frequenzen im Spektralbild auslöschen

---

<sup>54</sup> Vgl. *ht\_ibanez\_M1.wav* mit *ht\_ibanez\_M2.wav*

<sup>55</sup> Vgl. (Taylor, 2013, S. 111 f.)

<sup>56</sup> Vgl. (Görne, 2015, S. 28)

(bei ganzzahligen Vielfachen der Phase) oder verstärken können (maximal bei ungeraden Vielfachen der Phase).<sup>57</sup> Deswegen bleibt die Positionierung des Mikrofons im Raum ein Kompromiss zwischen der Vermeidung von Phasendifferenzen (kurzer Abstand zum Instrument) sowie dem Erfassen einer spektral ausgewogenen Impulsantwort (langer Abstand zum Instrument, um möglichst viel Abstrahlcharakteristik aufzuzeichnen).

Weitere Einflussfaktoren auf den Klang der Impulsantwort (und somit auf das aufgezeichnete Übertragungsverhalten) sind das Mikrofon selbst sowie die Signal-, bzw. Übertragungskette. Da durch Vorverstärkung auch der Rauschanteil verstärkt wird, lässt sich dies als zusätzlichen Einflussfaktor identifizieren (s. Abbildung 21 für eine graphische Skizzierung der Faktoren).

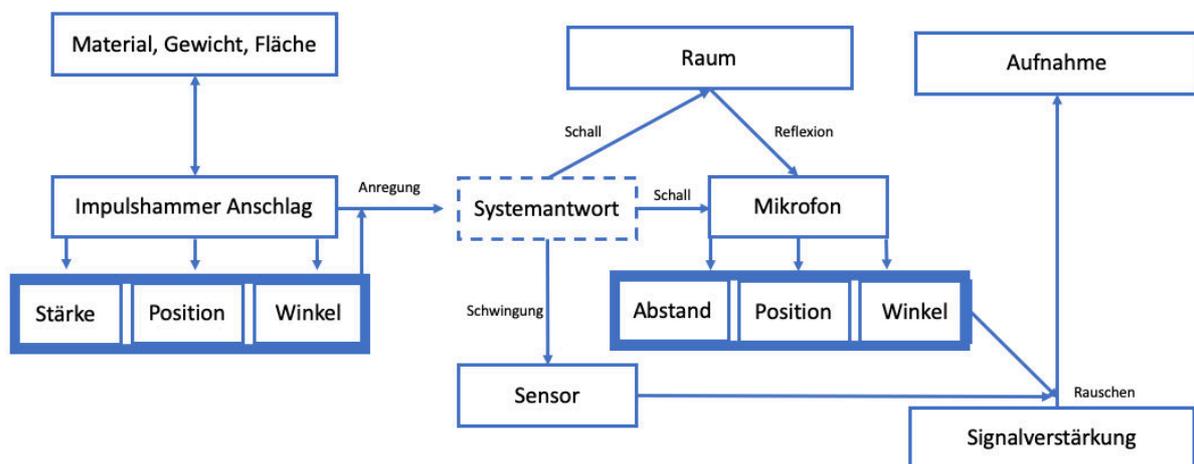


Abbildung 21: Einflussfaktoren der Impulsmessung

Bei LTI-Systemen wird davon ausgegangen, dass (aufgrund der Linearität) Änderungen am Eingang sowie im Übertragungsverhalten direkten Einfluss auf das Signal des Ausgangs nehmen. Somit führt die Abwandlung eines der genannten Faktoren zu einer Veränderung des Kluges des Ausgangssignals.

<sup>57</sup> Vgl. (Kammeyer & Kroschel, 2012, S. 33)

## 5.2.2 Optimierungsoptionen der Messung und Auswertung

Für diese Betrachtung ist der menschliche Faktor im Sinne der Anschlagsstärke und des -ortes mit dem Impulshammer nicht zu minimieren. Dennoch können Vergleiche von verschiedenen Systemreaktionen gezogen werden und diese klanglich beurteilt werden. Es wird ein einzelner Impulshammer benutzt, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Den Einfluss des Mikrofons und damit verbunden, den des Raumes, lässt sich durch die Verwendung des Beschleunigungsaufnehmers umgehen. Dieser misst das Übertragungsverhalten aufgrund der Schwingung an der Stegeinlage, da hier die Energie der Saiten auf den Korpus übertragen wird. Weil das Schwingverhalten des ganzen Instrumentes reziprok auf den Steg wirkt, lässt sich mit dem Sensor ein vollumfängliches Klangbild des Instrumentes aufzeichnen. Zum Vergleich wird dennoch der Versuch mit einem Messmikrofon wiederholt, um diese beiden Ansätze bewerten zu können. Im Rahmen dieser Arbeit wird von einer statischen Position gemessen und das Ergebnis mit dem Messsensor verglichen. Da der Sensor ein vom Raum isoliertes Signal erfasst und ein ausgewogenes Spektraldichtebild erzeugt, wird davon ausgegangen, dass das aufgezeichnete Signal eine Verbesserung zum Mikrofon darstellt.

Um eine Spielsituation einer Musikerin oder eines Musikers zu simulieren, wird die Mandoline parallel zu einer Wand an einer Aufhängung angebracht. Bei der Aufnahme wird darauf geachtet, einen präzisen Schlag auf den Steg auszuführen und das Signal zu verstärken, ohne Clipping zu erzeugen und das Rauschen möglichst gering zu halten.

Zur Vereinfachung der Auswertung der Ergebnisse wird eine Amplitudennormierung durchgeführt. Mit der Normierung von realen physikalischen Größen können Ausdrücke vereinfacht dargestellt und verglichen werden. Die Normierung von Signalen teilt sich in zwei Schritte auf, die Amplitudennormierung sowie die Zeitnormierung.

Für die Amplitudennormierung werden die verwendeten Signale als dimensionsloses Vielfaches einer Bezugsgröße dargestellt. Eine übliche Art der Normierung ist der Bezug der jeweiligen Größe auf SI-Einheiten<sup>58</sup>, da wegen der Kohärenz des SI-Einheitensystems die Normierung der Zahlenwerte aller Größen gleichbleibt. Eine Normierung der Zeitwerte ergibt

---

<sup>58</sup> Internationales Einheitensystem

Sinn, wenn alle Zeitangaben als dimensionsloses Vielfaches einer Bezugszeit ausgedrückt werden sollen.<sup>59</sup> Für die weitere graphische Auswertung werden Impulsantworten mit einer Länge von  $\delta t = 1\text{ s}$  untersucht, da in der frequenzabhängigen Betrachtungsweise eine Auflösung von  $\delta f = 1\text{ Hz}$  erreicht werden soll (vgl. Kapitel 5.2.4).

### 5.2.3 Auswertung der Impulsantworten

Bei der Durchführung der Messung wurden mehrere Hammerschläge zur Anregung nacheinander ausgeführt. Somit liegt eine Vielzahl von aufgenommenen Impulsantworten vor. Diese unterscheiden sich, wie erörtert, in der Anschlagstärke sowie in der ungefähren -position. Nachfolgend werden die Ergebnisse dieser Messung graphisch dargestellt und verglichen. Hierzu müssen die IRs mittels der DAW Logic Pro X geschnitten werden, um sie im Anschluss durch Rendering zu exportieren. Als Auflösung wurden  $24\text{ Bit}$ , bei einer Abtastfrequenz von  $41\text{ kHz}$  im Wave-Format, gewählt. Da die Aufnahme im Stereo erfolgte, wurde auf dem linken Kanal die Amplitude des Hammeranschlages aufgezeichnet und auf dem rechten Kanal die gemessene Impulsantwort (s. Abbildung 22).

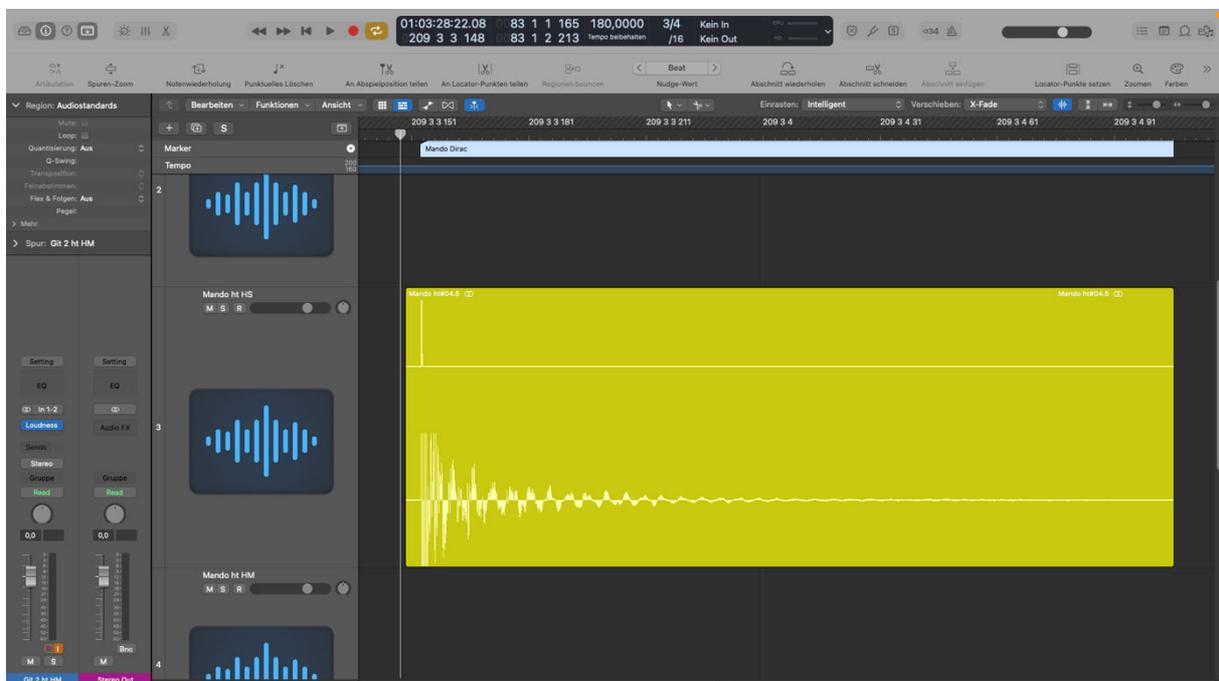


Abbildung 22: Recording der Impulsantwort, oben Anschlag des Hammers, unten gemessene IR.

<sup>59</sup> Vgl. (Hochschule Karlsruhe, 2022)

Bei der Messung mit dem Mikrofon fällt auf, dass der Abstand zu geringen Laufzeitdifferenzen geführt hat, was bei der Messung mit dem Beschleunigungsaufnehmer nicht der Fall war (siehe Abbildung 23).

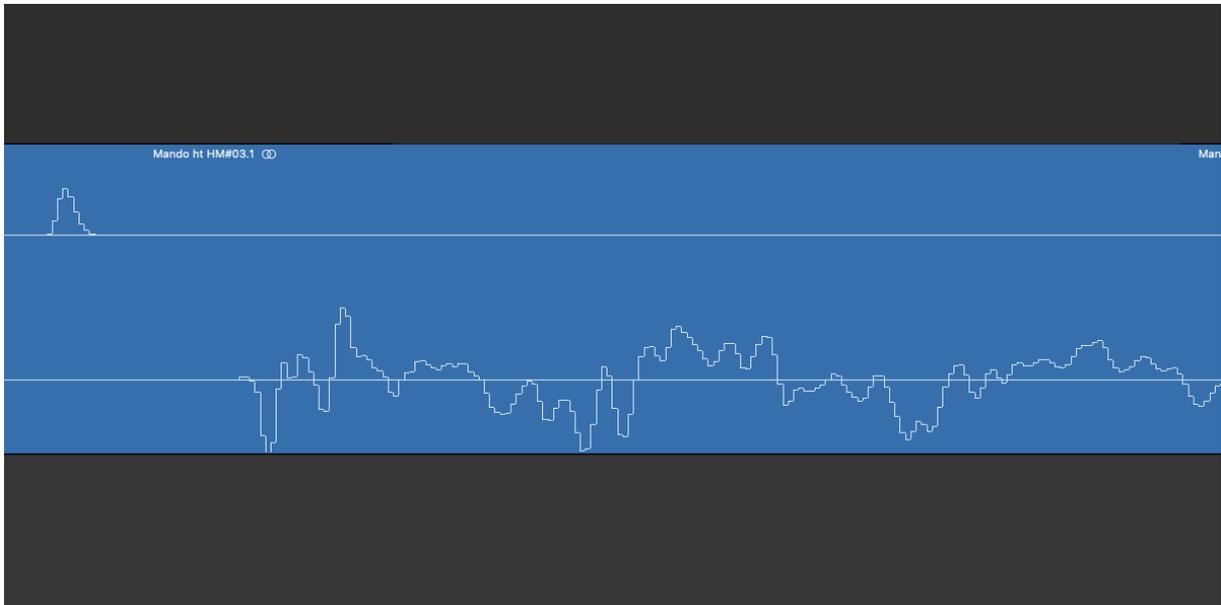


Abbildung 23: Laufzeitunterschiede bei der Messung mit Mikrofon

Inwiefern sich Laufzeitunterschiede und Raumanteil auf die Qualität der virtuellen Mandoline auswirken, lässt sich nach der Durchführung der Faltungsoperation bestimmen. Erste Unterschiede zwischen den verschiedenen Messungen lassen sich bereits feststellen. Zum Vergleich werden zwei IRs der Hofer-Gitarre, mit Mikrofon und Sensor aufgenommen, ausgewertet. Die graphische Auswertung erfolgt mit MATLAB. Hierfür werden zwei Graphen erstellt. Dazu wird der Betragswert der Amplitude des Signals auf den Wert 1 normiert. Zusätzlich wird der rechte Kanal, welcher die IR aufgezeichnet hat, ausgewählt und die Länge der Zeitachse definiert. Folgender Code wird verwendet:

```
% Einlesen der Impulsantwort
[ht,fs] = audioread('ht_Hofer_M1.wav');

% Monosignal und Amplitudennormierung
htmono = ht(:,2);
IR = htmono/max(abs(htmono));

% Zeitachse definieren
t = (0:(length(IR)-1))*(1/fs);

%Plot
plot(t, IR);
title('Impulsantwort M1 der Hofer-Gitarre');
xlabel('t in s');
ylabel('h(t)');
```

Dadurch ergibt sich die Auswertung für die Signale *ht\_Hofer\_M1.wav* und *ht\_Hofer\_S1.wav* (vgl. Abbildung 24 und Abbildung 25)

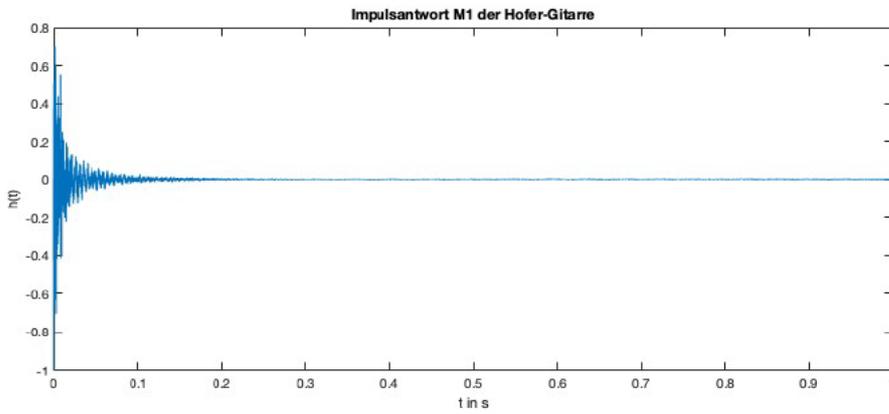


Abbildung 24: Norm. IR der Hofer Gitarre, aufgenommen mit Mikrofon (M1).

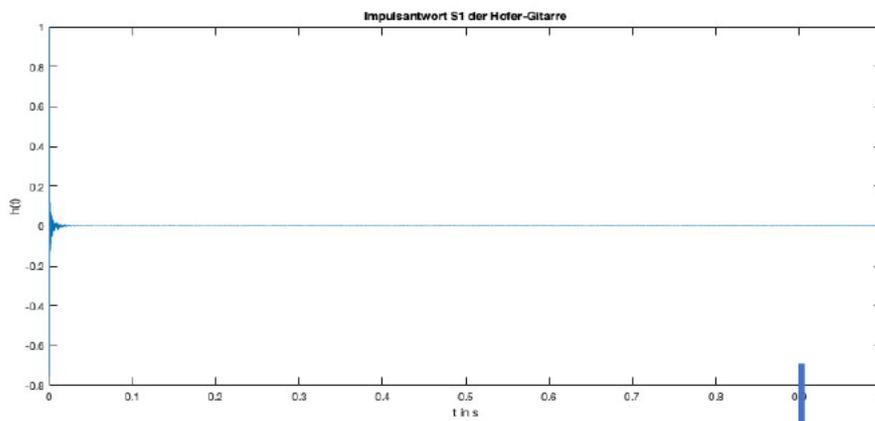


Abbildung 25: Norm. IR der Hofer Gitarre, aufgenommen mit Sensor (S1).

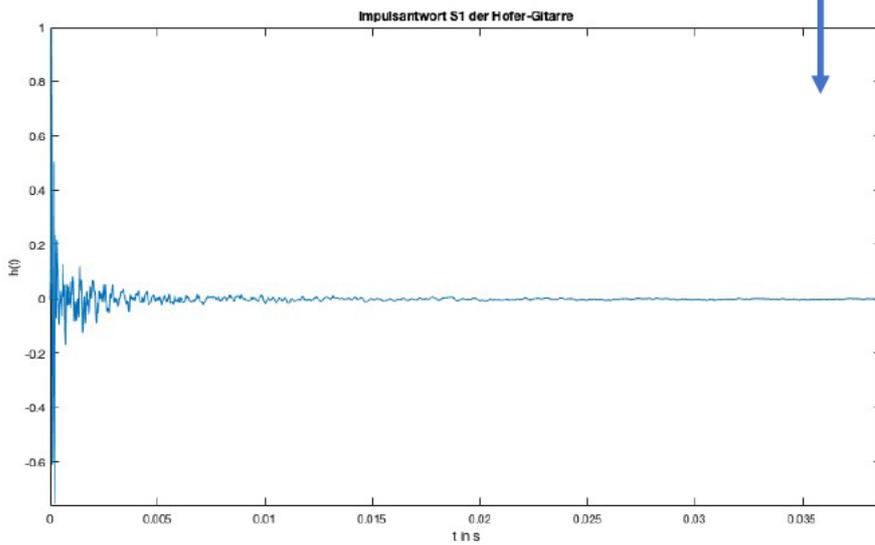


Abbildung 26: Norm. IR der Hofer Gitarre, aufgenommen mit Sensor (S1) [Zoom in].

Beim Vergleich der beiden Impulsantworten fällt auf, dass die Aufnahme mit Mikrofon (Abbildung 24) einen wesentlich längeren Amplitudenverlauf besitzt. Dies kann an der Anschlagsstärke des implizierten Impulses liegen, allerdings haben zusätzlich frühe Reflexionen das Mikrofon angeregt. Wenn davon ausgegangen wird, dass die ersten Reflexionen eine Strecke von  $60\text{ cm} = (15 + 15 + 30)\text{ cm}$  zurücklegen, treten sie bereits nach  $t = 0,6\text{ m}/343\frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 1,75\text{ ms}$  auf. Diese Raumanteile sind auf der Aufnahme des Mikrofons hörbar (vgl. *ht\_Hofer\_M1.wav* mit *ht\_Hofer\_S1.wav*).

Da es bei der Messmethode mit Impulshammer zu unterschiedlichen Anschlagsstärken kommt, wird empfohlen auf die Vorverstärkung zu achten sowie eine Vielzahl von Schlägen auszuführen, um Übersteuerung zu vermeiden.

Nachfolgend werden die Impulsantworten der Hofer-Gitarre mit einer Sensormessung der Mandoline (*ht\_Mando\_S1.wav*) verglichen (Abbildung 26 und Abbildung 27).

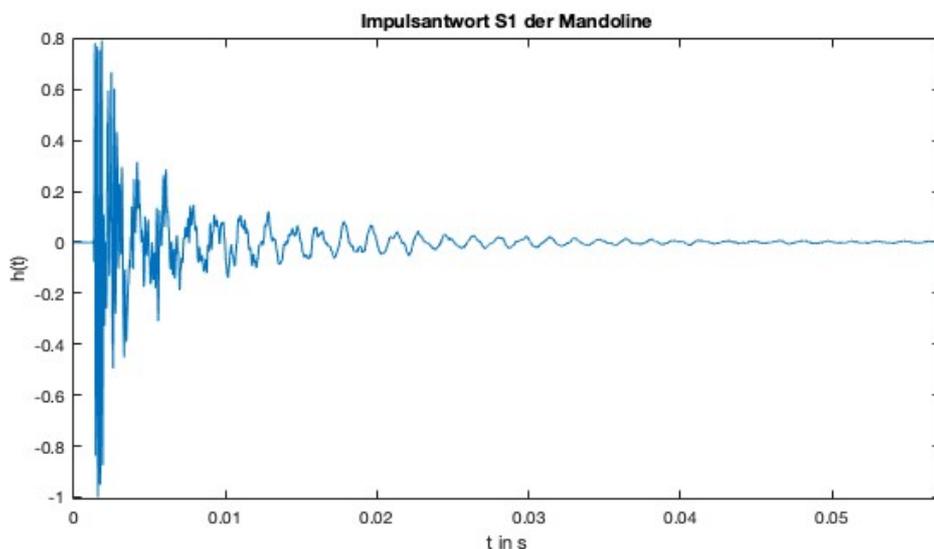


Abbildung 27: Norm. IR der Mandoline, aufgenommen mit Sensor (S1) [Zoom in].

Im Vergleich zur Sensormessung der Gitarre (Abbildung 26) fällt das deutlich spätere Abklingen der Impulsantwort auf. Dies kann an der Anschlagsstärke des Hammers sowie an der -position liegen. Damit bestätigt sich der Eindruck, dass die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Impulshammer-Methode erschwert wird.

Weil aus den Darstellungen im Zeitbereich keine Aussagen über das Übertragungsverhalten getroffen werden können, ist eine Transformation in den Frequenzbereich notwendig. Somit lässt sich der Frequenzgang der gemessenen Instrumente bestimmen.

## 5.2.4 Spektrale Auswertung des Übertragungsverhaltens

Signale können auf verschiedene Weisen betrachtet werden. Die zeitliche Darstellung ermöglicht die Länge eines Signals zu determinieren sowie das Amplitudenverhalten bestimmen zu können. Dies ist wichtig, um beispielsweise Übersteuerung und somit Verzerrung eines Signals erkennen zu können. Dennoch lässt sich mit der zeitabhängigen Betrachtungsweise keine Aussage über die klanglichen Eigenschaften der gemessenen Impulsantworten treffen. Hierfür ist eine Transformation in den Frequenzbereich notwendig. Die hierfür umgesetzten theoretischen Grundlagen wurden in Kapitel 2.4 Fourier-Transformation zur schnellen Faltung erläutert. Mit dem Algorithmus der FFT, welcher auf der diskreten Fourier-Transformation beruht, kann in MATLAB das Ergebnis dieser Rechenoperation graphisch dargestellt werden.

Im Frequenzbereich wird einem Signal ein sogenanntes Spektrum und einem System ein sogenannter Frequenzgang zugeordnet. Da die Mandoline als übertragendes System fungiert, liefert ihr Frequenzgang Aussagen über das Übertragungsverhalten und somit die klanglichen Eigenschaften des Instrumentes.<sup>60</sup> Signale können als Überlagerung von harmonischen Schwingungen dargestellt werden, was sich in MATLAB wie folgt umsetzen lässt:

```
% Einlesen der Impulsantwort
[ht,fs] = audioread('ht_Mando_S1.wav');

% Monosignal und Amplitudennormierung
htmono = ht(:,2);
IR = htmono/sqrt(sum(abs(htmono).^2));
N = length(IR);
Aufloesung = fs/N;

%Fourier-Transform
Hf = fft(IR);
Hf = 1/10*(Hf);
f = (0:N-1)*fs/N;

%Plot
plot(f, abs(Hf));
semilogx(f,abs(Hf));
axis([20 20000 0 1]);
title('Übertragungsfunktion S1 der Mandoline');
xlabel('f in Hz');
ylabel('H(f)');
```

---

<sup>60</sup> Vgl. (Hochschule Karlsruhe, 2022)

Zu beachten ist, dass die Länge  $N$  des Signals, mindestens der verwendeten Abtastrate  $f_s = 44,1 \text{ kHz}$  entspricht (mindestens  $N = 44.100$  Samplewerte). Dies ist notwendig, um eine Frequenzauflösung des Spektrums  $\delta f \geq 1 \text{ Hz}$  zu garantieren. Die Auflösung berechnet sich aus  $\delta f = f_s/N$ .<sup>61</sup> Somit ergeben sich aus der FFT der Signale *ht\_Mando\_S1.wav* (Abbildung 28) und *ht\_Mando\_S2.wav* (Abbildung 29) folgende Übertragungsfunktion:

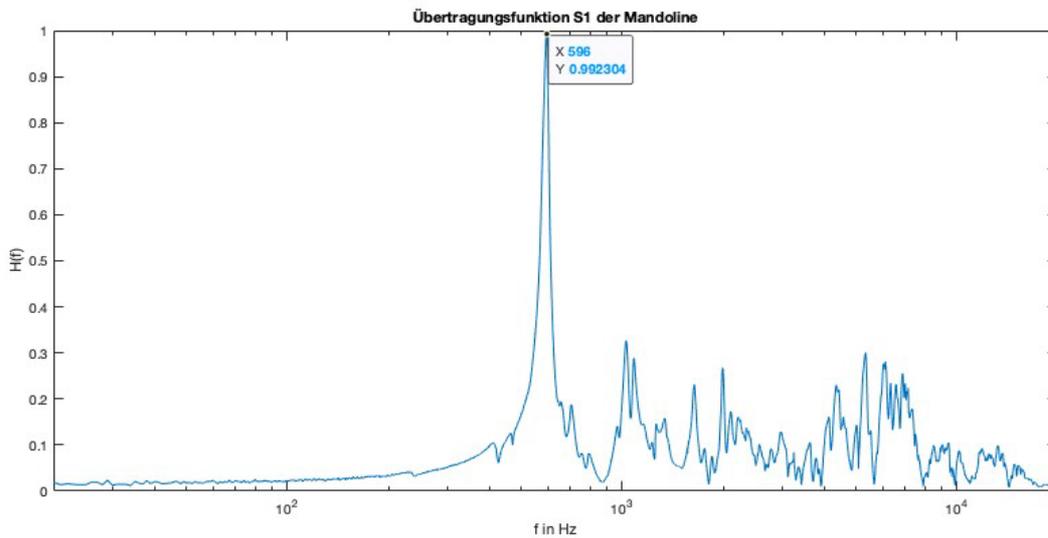


Abbildung 28: Norm. Übertragungsfunktion der Mandoline, aufgenommen mit Sensor (S1).

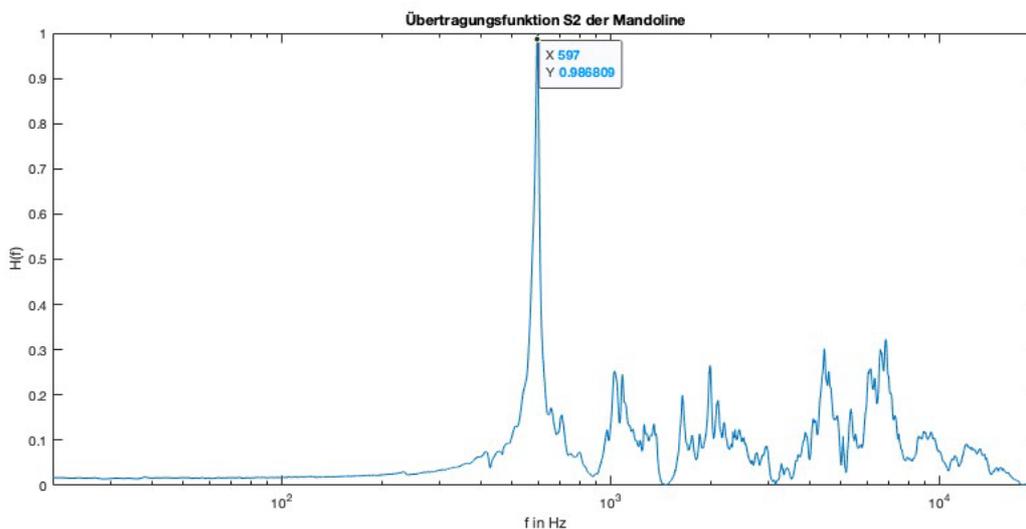


Abbildung 29: Norm. Übertragungsfunktion der Mandoline, aufgenommen mit Sensor (S2).

Die spektralen Darstellungen der beiden aufgenommenen Impulsantworten der Mandoline zeigen ein ähnliches Übertragungsverhalten, auch wenn sich manche Peaks in ihrer Ausprägung unterscheiden (besonders im hochfrequenten Anteil). In dieser spektralen

<sup>61</sup> Vgl. (Mietzner, 2020, S. 12 f. (Kap. 6))

Ansicht lassen sich die unterschiedlichen Pegelspitzen einzelner Resonanzen präzise erkennen. Bei etwa 590 – 600 Hz tritt bei beiden IRs die größte Resonanz auf. Dabei ist auffällig, dass insbesondere dieses Frequenzband in beiden Messungen eine hohe Aussteuerung aufweist. Somit ist davon auszugehen, dass nach der Faltung mit dem Eingangssignal eine hohe Resonanz beim Anregen dieser Frequenz auftritt. Um auszuschließen, dass diese Resonanz auf die Messmethode mit dem Impulshammer zurückzuführen ist, wird das Spektrum der Hofer-Gitarre ausgewertet (siehe Abbildung 30).<sup>62</sup> Ein Vergleich mit der Übertragungsfunktion der Hofer-Gitarre zeigt, dass dasselbe Frequenzband bei der Gitarre nicht in diesem Maße angeregt wird:

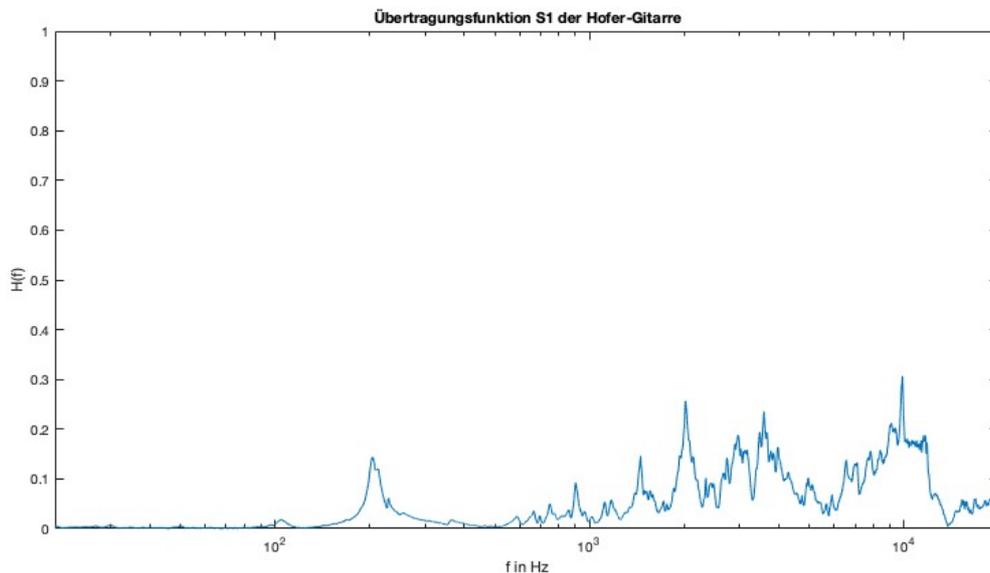


Abbildung 30: Übertragungsfunktion der Hofer-Gitarre, aufgenommen mit Sensor (S1).

Das Spektrum der Hofer-Gitarre zeigt keine „hervorstechende“ Resonanz, wie bei der Mandoline. Der Frequenzgang wirkt komprimierter, einzelne Peaks sind bei etwa 200 Hz, 2 KHz und 3,6 KHz erkennbar. Daher sollte weitergehend betrachtet werden, wieso die Mandoline eine besonders starke Resonanz bei etwa 600 Hz besitzt.

Einen Erklärungsansatz liefert *T. D. Rossing* mit der Untersuchung von Korpusmoden der Mandoline. Es wird beschrieben, dass Mandolinen sehr individuelle Übertragungsfunktionen besitzen: "[...] it can be seen that the (0,0) mode is a doublet occurring at 500 Hz or higher.

<sup>62</sup> Übertragungsfunktion des Signals *ht\_Hofer\_S1.wav*

The ladder bracing combined with the narrow width (appr. 20 cm) of the top plate results in high body mode frequencies" (Rossing & Cohen, Mandolin Family Instruments, 2010, S. 87 ff.).

Die erste und tiefste Mode (0,0) einer neapolitanischen Mandoline liege nach *Rossings* Messung zwischen 529 - 618 Hz. Moden entstehen im Korpus der Mandoline durch stehende Wellen. Sie sind abhängig von Material und Bauform des Instrumentes und lassen sich in n-Ordnungen messen. „The (0,0) mode is a trampoline-like motion of each plate, in which all areas of the plate move in phase.“ (Rossing & Cohen, Mandolin Family Instruments, 2010, S. 85 f.). Es wird sich damit auf die Holzplatten des Korpus bezogen, welche durch eine Kraftanregung zu schwingen beginnen. Somit kann die gemessene Resonanz der Mandoline bei ca. 600 Hz auf durch den Korpus erzeugte Moden zurückgeführt werden. Daher sei die starke Betonung dieses Frequenzbandes durch Material und Bauform der Mandoline zu erklären. Wie sich dies auf das Ergebnis der Faltung auswirkt, wird im nachfolgenden Kapitel beschrieben werden (siehe Kapitel 6.3.3).

Als Fazit der Messung lässt sich festhalten, dass die Impulshammer-Methode leicht und schnell umsetzbar ist und valide Resultate hervorruft. Allerdings ist die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nur eingeschränkt möglich, was eine vergleichende Analyse erschwert. Insbesondere der menschliche Faktor ist ein Problem. Mit einer mechanischen und kalibrierten Ausrichtung des Hammers, welcher in gleicher Intensität denselben Ort des Systems anregt, könne dieses Problem optimiert werden. Alternativ sei eine andere Methode, wie die Drahtmethode, zur Messung möglich.

Zudem wird empfohlen, die Messung mit einem Beschleunigungssensor durchzuführen, da dieser das spektrale Dichtebild des Instrumentes vollumfänglich erfasst. Die dabei festgestellte Resonanz der Mandoline bei ca. 600 Hz könne durch Moden, erzeugt durch bauteilbedingte Elemente erklärt werden. Der klangliche Einfluss dieser Resonanz wird im nachfolgenden Kapitel erörtert.

## 6 Klangsynthese durch digitale Faltung

Zentraler Kern dieser Arbeit ist die Faltungsoperation aus zwei gegebenen Signalen. Bisher wurde die elektrische Gitarre als Generatorinstrument betrachtet und damit verbunden die Faktoren, welche Einfluss auf das Ergebnis der Untersuchung nehmen. Zusätzlich wurde die Mandoline als übertragendes System diskutiert und Impulsantworten des Instrumentes gemessen. Zur besseren Vergleichbarkeit und Diskussion der Ergebnisse wurden zudem Impulsantworten zweier Gitarren gemessen. Im Nachfolgenden werden die bisher gesammelten Informationen zusammengeführt und erörtert. Ziel ist es, mit der Software MATLAB die in Kapitel 2 betrachtete Faltungsoperation und damit die virtuelle Mandoline zu realisieren (vgl. Abbildung 31). Die erhaltenen Ergebnisse werden bewertet und Optimierungspotenziale diskutiert.

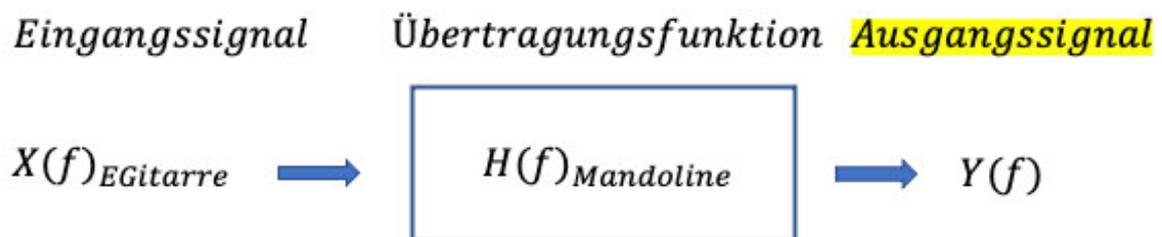


Abbildung 31: Einfaches Blockschaltbild der Faltungsoperation

Zunächst muss als Voraussetzung für die Faltungsoperation das Eingangssignal  $x(t)$  mit Hilfe des Generatorinstrumentes erzeugt werden. Da aufgrund der erörterten Linearität von Systemen das Eingangssignal maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis der Faltungsoperation nimmt, wird im Folgenden näher beschrieben, wie das Signal erzeugt wird. Im Anschluss wird die Faltungsoperation mit der gemessenen Impulsantwort durchgeführt werden.

### 6.1 Erzeugung des Eingangssignals

Startpunkt ist die Aufnahme der elektrischen Gitarre, das Instrument wird hierfür mit der DAW „Logic Pro X“, welche auch für die Messung der Impulsantwort genutzt wurde, aufgenommen. Hierzu fließt das direkte Signal der Gitarre über ein handelsübliches asymmetrisches 6,3 mm

Klinkenkabel in das Audiointerface „Scarlett 2i2“. Das Interface verstärkt das erhaltene Instrumentensignal und wandelt es durch Abtastung und Quantisierung in ein digitales Signal. Das aufgenommene Signal soll möglichst unbearbeitet sein, weswegen (abgesehen von Pre-Gain) auf signalbeeinflussende Faktoren wie EQ oder Kompression verzichtet wird. Ein Gitarrenverstärker ist für die MATLAB-Anwendung, im Gegensatz zur Echtzeit-Implementierung nicht notwendig.

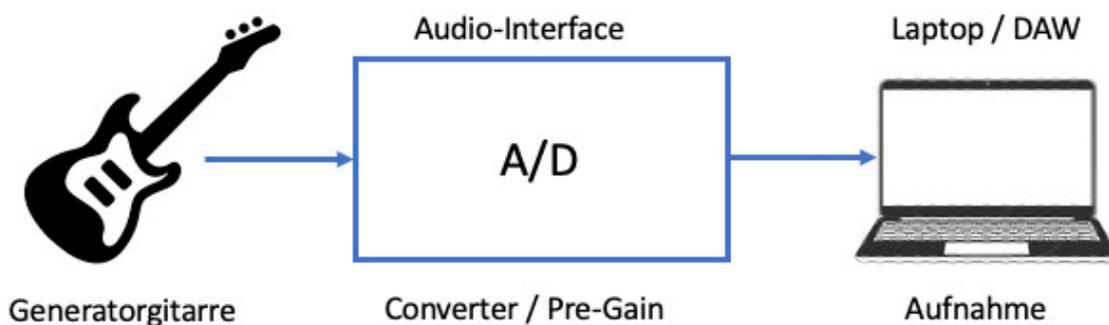


Abbildung 32: Erzeugung des Eingangssignals.

Da das Generatorinstrument eine Fender Stratocaster<sup>63</sup> ist, welche über verschiedene Tonabnehmer-Einstellungen gespielt werden kann, werden die beiden in Kapitel 3 erörterten Tonabnehmer-Positionen eingestellt. Für den Vorab-Versuch mit der Ibanez-Westerngitarre wird dieselbe Akkordsequenz zweimal eingespielt.<sup>64</sup> Eine Aufnahme wird mit dem Tonabnehmer in Halsposition gemacht, eine zweite mit dem Tonabnehmer in der Stegposition. Anschlagstärke und -position werden möglichst gleichbleibend ausgeführt. Beide Aufnahmen klingen hörbar verschieden und besitzen ein differentes Timbre. Dies lässt sich mit der Position des PUs sowie mit der Bauart (Single Coil vs. Humbucker) erklären (vgl. 3.1). Somit werden die Ergebnisse der Faltung hörbar verschieden klingen.

Die beiden eingespielten Akkordfolgen eignen sich nur bedingt für die Faltung mit der Übertragungsfunktion der Mandoline. Theoretisch können beliebige Signale miteinander gefaltet werden, jedoch soll für diese Untersuchung ein authentisches Signal einer (virtuellen)

<sup>63</sup> Siehe Abbildung 7: Skizze einer HSS Stratocaster, (depositphotos.com)

<sup>64</sup> Vgl. *xt\_Chords\_BPU.wav* und *xt\_Chords\_NPU.wav*

Mandoline entstehen. Daher sollten Tonhöhen gewählt werden, welche von einer realen Mandoline wiedergegeben werden können. In der beispielhaften Akkordsequenz Dm-Am-Gm/B-F/C schwingt der tiefste Grundton 110-mal in der Sekunde, was einem A2 entspricht. Wie erörtert ist in der Standardstimmung der tiefste Ton einer Mandoline ein G3, was einer Frequenz von 196 Hz entspricht.<sup>65</sup>

Deswegen wird im Sinne der Authentizität eine zusätzlich Akkordfolge aufgenommen, welche in dieser Form auf einer realen Mandoline spielbar wäre. Dafür muss das Generatorinstrument modifiziert werden: Da die Mandoline vier Saiten(-Paare) besitzt, werden die tiefsten zwei Saiten der E-Gitarre entfernt, um unerwünschte Resonanzen durch ein versehentliches Mitschwingen zu vermeiden. Zudem werden für die vier höchsten Saiten der E-Gitarre Durchmesser gewählt, welche dem eines üblichen Saitensets einer Mandoline nahekommen.<sup>66</sup> Es werden Stahlsaiten mit der Stärke 0,010 - 0,013 - 0,026 - 0,036 Zoll Durchmesser (von hoch nach tief) genutzt. Diese werden nach dem Standard einer Mandoline im Quintabstand gestimmt: G3-D4-A4-E5 (von tief nach hoch). Allerdings würden die Saiten der Gitarre reißen, wenn sie im selben Register, wie die der Mandoline gestimmt wären, da aufgrund des längeren Halses der Gitarre eine höhere Zugkraft nötig wäre, um die Tonhöhe der Mandoline zu erreichen. Daher werden die Saiten der Gitarre eine Oktave niedriger als die der Mandoline gestimmt. Zur Erreichung desselben tonalen Registers der Mandoline und zur Simulation des kürzeren Halses und Korpus, wird ein Kapodaster im 12. Bund genutzt, welcher die Tonhöhe der Saiten um eine zusätzliche Oktave transponiert.

Es wird folgend eine bekannte Akkordsequenz genutzt, welche als Referenz für die Faltung dient.<sup>67</sup> Dafür wird das Intro des populären Songs „Losing my Religion“ (1991) der Gruppe R.E.M. gewählt. Da das Intro ebenso auf einer Mandoline gespielt wird, kann ein Vergleich zu einem existierenden Musikstück gezogen werden. Leider lässt sich für das Aufnehmen des Eingangssignals keine 12-saitige E-Gitarre verwenden, welche besser den Effekt der Saitenpaare einer Mandoline simulieren kann, da sie ebenfalls aus (sechs) Saitenpaaren besteht.

---

<sup>65</sup> (Wikipedia, 2022)

<sup>66</sup> Vgl. hierfür Kap. 4.1

<sup>67</sup> *xt\_REM\_NPU.wav*

## 6.2 Digitale Faltung mittels MATLAB

Die Faltungsoperation lässt sich durch die Software MATLAB realisieren. Mit Hilfe des Befehls „Convolve“ können zwei Signale gefaltet werden. Der Befehl nutzt die in Kapitel 2.4 (Fourier-Transformation zur schnellen Faltung) beschriebene Methode, um für die Faltung Rechenkapazität und somit Zeit zu sparen. Dadurch werden die beiden diskreten Signale  $x[n]$  und  $h[n]$  in den Frequenzbereich fourier-transformiert und dann miteinander multipliziert:  $Y[k] = X[k] * H[k]$ . Anschließend wird das Ergebnis der diskreten Fourier-Transformation rücktransformiert (inverse DFT).<sup>68</sup> Die algorithmisch-optimierte Form der DFT, die schnelle FT (FFT) wird hierfür verwendet.

Zunächst werden in MATLAB die beiden zur Faltung benötigten Signale eingelesen und die Abtastfrequenz  $f_s$  bestimmt. Für das Eingangssignal *xt\_REMI\_NPU.wav* ergeben sich beispielsweise  $990.108 \cdot 2^{69}$  Samplewerte. Es wird lediglich ein Kanal zur Faltung genutzt, da das Ergebnis im Mono-Format generiert wird. Die Länge der Impulsantworten beträgt  $t = 1 \text{ s}$ , was 44.100 Samplewerten entspricht, um eine Frequenzauflösung von  $1 \text{ Hz}$  zu garantieren. Die Bezeichnung der verwendeten Eingangssignale (siehe Anhang) setzt sich aus folgender Logik zusammen: Funktion („xt“), Inhalt/Song („REM“) und Tonabnehmer-Konfiguration („NPU“=Neck Pickup). Alle verwendeten Signale sind im WAVE-Format gerendert, bei  $44,1 \text{ kHz}$  und  $24 \text{ Bit}$  Quantisierung.

Da die Eingangssignale im Stereo-Format vorliegen, muss in MATLAB kenntlich gemacht werden, dass nur einer der beiden Stereo-Kanäle zur Faltung genutzt wird. Beide Kanäle beinhalten dieselben Informationen, weswegen ein beliebiger Kanal gewählt werden kann. Bei den Impulsantworten muss hingegen der zweite Kanal (also der rechte) genutzt werden, da der linke Kanal die Kraftübertragung der Impulshammer-Spitze aufgezeichnet hat. Die relevante Systemantwort befindet sich auf dem rechten Kanal (vgl. Abbildung 22). Innerhalb der Funktion „Convolve“ kann ausgewählt werden, welcher Audio-Kanal zur Faltung genutzt werden soll.

---

<sup>68</sup>  $F^{-1}\{Y[k]\} = y[n]$ ; vgl. Kap. 2.3 Digitale Faltung.

<sup>69</sup> Mal zwei, da Stereo-Format.

Schlussendlich wird der Amplitudenwert der Faltungsoperation auf den Wert 1 normiert, als dimensionslose Bezugsgröße. Die geschieht, indem jeder Samplewert durch den maximalen Betragswert der Ausgangsfunktion geteilt wird. Als letzten Schritt wird aus dem Ergebnis der Faltung eine Audiodatei erzeugt. Für die digitale Faltung in MATLAB ergibt sich somit folgender Code:

```
%Einlesen der Audiodateien
[xt,fs] = audioread('xt_REM_NPU.wav');
[ht,fs] = audioread('ht_Mando_S3.wav');

%Faltung
yt = (conv(xt(:,1),ht(:,2)));
yt = yt/max(abs(yt));

%Erzeugen der Audiodatei für yt
audiowrite('yt_Mando_S3xREM_NPU.wav',yt,fs);
```

Die gesamte Rechendauer für den verwendeten Code beträgt etwa 5 Sekunden. Hierbei werden die 990.108 Samplewerte des Eingangssignals mit den 44.100 Samplewerten der Impulsantwort verrechnet (s. Abbildung 33).

Function Name	Calls	Total Time (s) <sup>‡</sup>	Self Time* (s)	Total Time Plot (dark band = self time)
<a href="#">Faltung_Mandoline</a>	1	5.085	0.012	
<a href="#">conv</a>	1	4.814	4.814	
<a href="#">audioread</a>	2	0.185	0.002	
<a href="#">audioread&gt;readaudio</a>	2	0.160	0.021	
<a href="#">audiowrite</a>	1	0.074	0.007	

Abbildung 33: Dauer der Faltung in MATLAB.

Die Dauer der Faltung wirft die Frage auf, ob sich eine Anwendung der virtuellen Mandoline in Echtzeit realisieren lässt. Hierfür würde eine sehr geringe Latenz im Bereich von wenigen Millisekunden benötigt werden, um Musizierenden ein schnelles Feedback ermöglichen zu können. Für eine schnellere Umsetzung der Faltung könnte die Auflösung verringert werden, indem die Länge Impulsantwort verringert wird. Eine geringere Auflösung würde eine schlechtere Audioqualität bedeuten. Auf diese Überlegung wird in Kapitel **Fehler!** **Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** eingegangen. Zunächst werden die Ergebnisse mit bereits aufgenommenen Signalen verglichen.

Die Beschriftung des Ausgangssignals setzt sich aus der Funktion („yt“), der gefalteten Impulsantwort („Mando\_S3“)<sup>70</sup> sowie des Eingangssignals zusammen („REM\_NPU“). Die Impulsantworten erhalten Ihre Beschriftung nach der Funktion („ht“), dem Instrument („Mando“) sowie der Aufnahmemethode („S“)<sup>71</sup> zusammen und erhalten eine fortlaufende Nummerierung (in diesem Fall „3“). Eine vollständige Auflistung aller genutzter Signal und eine Legende kann im Anhang eingesehen werden.

Zum Vergleich der Ergebnisse werden mehrere Impulsantworten der Instrumente ausgewertet. Zudem können die verschiedenen Messmethoden (Mikrofon vs. Sensor) bewertet werden sowie die Qualität der Ergebnisse in Abhängigkeit des gewählten Instrumentes. Begonnen wird mit dem Vergleich der verschiedenen Tonabnehmer-Konfigurationen des Eingangssignals.

Zusammenfassend bietet die Faltung in MATLAB schnelle Ergebnisse, welche sich einfach mit Hilfe des Befehls „Convolve“ realisieren lassen. Dadurch lässt sich eine Vielzahl von gefalteten Signalen erzeugen, welche analysiert werden können. Zudem kann mit MATLAB eine graphische Auswertung der Ergebnisse erstellt werden, indem die erzeugten Signale mit Hilfe des Befehls „plot“ visualisiert werden. Dafür wird jeweils ein Spektrum von einer Dauer von  $t = 1 \text{ s}$  ausgewertet. Die graphische Auswertung soll den Höreindruck unterstützen und Argumente untermauern. Im Folgenden wird auf die Ergebnisse der digitalen Faltungsoperation eingegangen.

---

<sup>70</sup> Die dritte betrachtete Impulsantwort der Mandoline, aufgenommen mit dem Messsensor.

<sup>71</sup> S = Sensor; M = Mikrofon.

## 6.3 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse

### 6.3.1 Vergleich der Tonabnehmer-Konfiguration

Die Bewertung der Ergebnisse der Faltungsoperation beginnt beim Anfang der Signalkette. Zu Anfang dieser Untersuchung wurde die E-Gitarre als Generatorinstrument beschrieben. Neben dem Einfluss des Spielenden (Anschlagsstärke und -ort) und den der Saiten, wurde im besonderen Maße auf den Einfluss des Tonabnehmers eingegangen. Es wurde erörtert, dass Bauart und Ort der Tonabnehmer entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der Faltungsoperation besitzen. Um diese These auditiv zu überprüfen, werden dieselben Akkorde auf der Generatorgitarre mit verschiedenen PU-Konfigurationen gespielt. Zwar können Anschlagsstärke und -ort des Spielenden nicht vollumfänglich repliziert werden, dennoch sind diese näherungsweise bei demselben Musizierenden gleich. Verglichen werden der Single Coil-PU in Halsposition und der Humbucker-PU in Stegposition.

Bereits ein subjektiver Hörtest der beiden erzeugten Eingangssignale (*xt\_Chords\_NPU.wav* und *xt\_Chords\_BPU.wav*) lässt klangliche Unterschiede erkennen. Da in dieser Arbeit mehrfach auf die Bedeutung der Linearität von LTI-Systemen eingegangen wird, lässt sich schlussfolgern, dass die klanglichen Unterschiede der PU-Konfiguration im Ergebnis der Faltung hörbar sind.

Zunächst werden die Spektren der Eingangssignale betrachtet.<sup>72</sup> Die Systemanregung stellt dabei das Anspielen eines Akkordes dar. Von den genannten Signalen wird daraufhin das Spektrum über die Dauer von einer Sekunde betrachtet (vgl. Abbildung 34 mit Abbildung 35).

---

<sup>72</sup> *xt\_Chords\_NPU.wav* und *xt\_Chords\_BPU.wav*

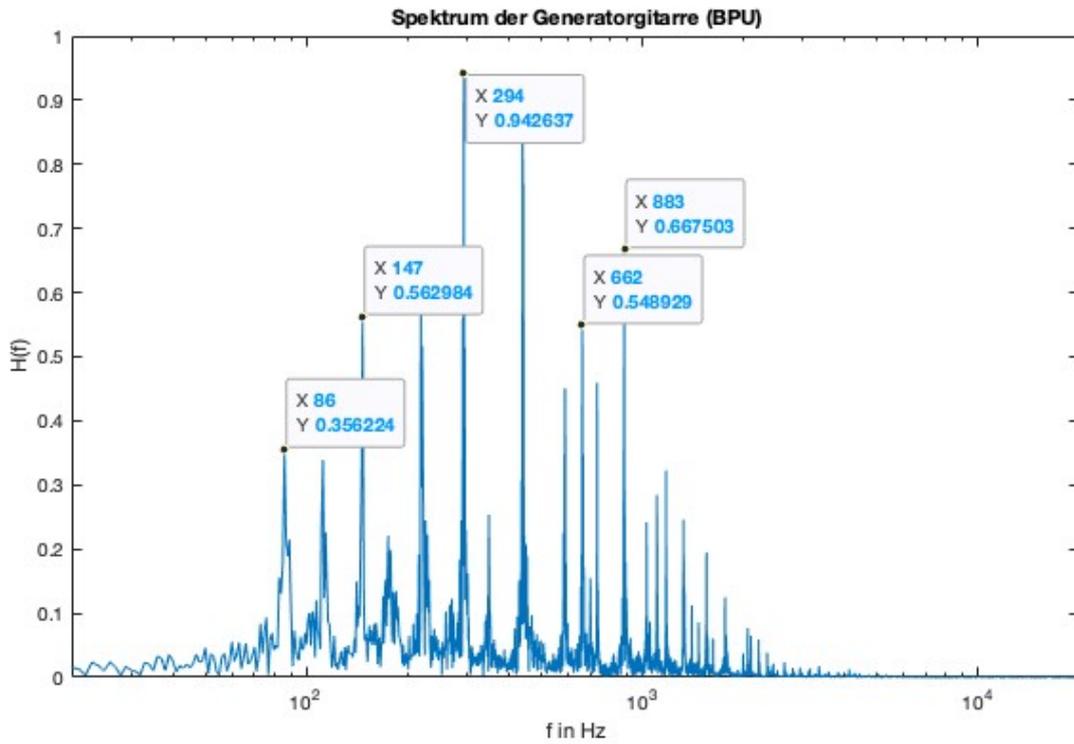


Abbildung 34: Spektrum des Steg-Tonabnehmers über 1 s (Humbucker).

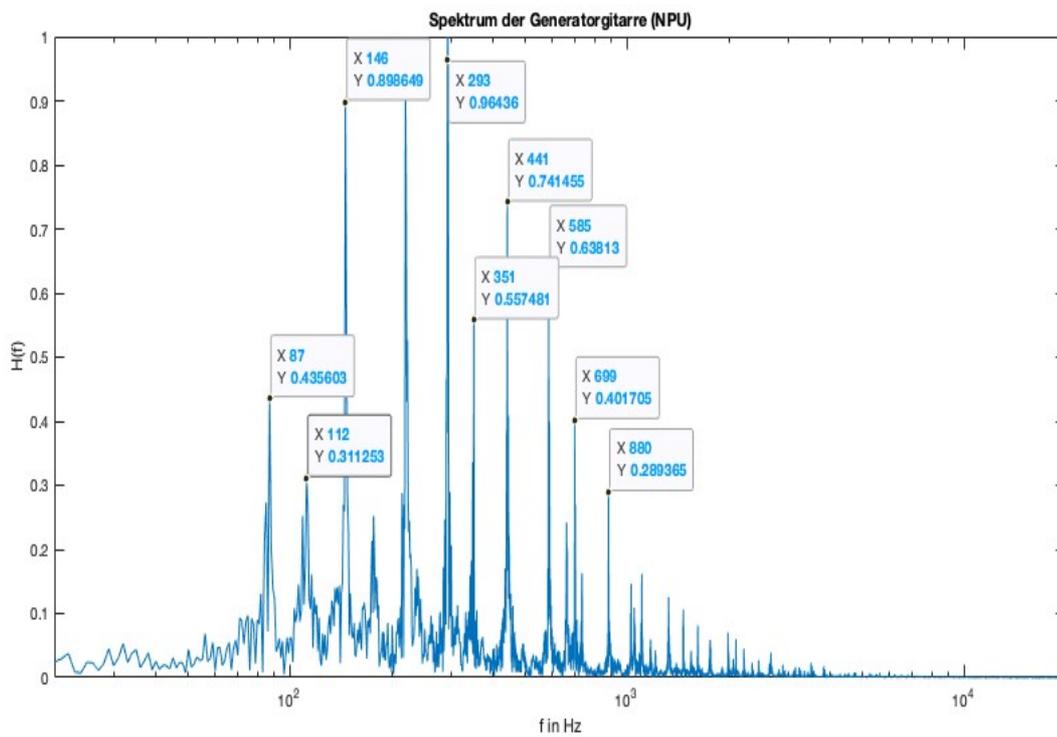


Abbildung 35: Spektrum des Hals-Tonabnehmers über 1 s (Single Coil).

Im Vergleich der beiden Tonabnehmer-Konfigurationen fällt auf, dass der Humbucker in der Steg-Position (vgl. Abbildung 34) eine stärkere Betonung der hohen Frequenzen besitzt. Diese Eigenschaft (bedingt durch die Position des Tonabnehmers) wurde in Kapitel 3.1.2 diskutiert. Obwohl Humbucker tendenziell höhenärmer seien, scheint die Stegposition im Bereich von 1 – 3 kHz für eine bessere Abnahme dieses Frequenzbandes zu sorgen. Zudem fällt auf, dass die Frequenzen der Grundtöne bei beiden Tonabnehmern in verschiedener Ausprägung betont werden. Der Single Coil-PU in der Halsposition betont im Verhältnis deutlich stärker tieffrequente Signalanteile. Zwischen 100 – 500 Hz zeigt der Humbucker ein dynamischeres Verhalten in den tiefen Mittenfrequenzen. Diese Frequenzen sind jedoch für die Eigenschaften der Mandoline von geringerer Relevanz, da das Instrument ein höheres Register besitzt als eine standardgestimmte Gitarre.<sup>73</sup>

In den hohen Mitten (hier zwischen 500 – 1000 Hz) wirkt das Verhalten des Single Coils ausgewogener. Da die Mandoline in diesem Bereich ihre Grundtöne und die ersten Harmonischen bildet, scheint das ausgewogenere Verhältnis der angesprochenen Frequenzen in den hohen Mitten ein Vorteil des Single Coils in der Hals-Position zu sein. Dies ist allerdings nur eine theoretische Betrachtung der Frequenzgänge, weswegen ein praktischer Hörtest helfen soll, die aufgestellte These zu verifizieren oder zu falsifizieren. Dafür werden beide Signale mit der Impulsantwort *ht\_Mando\_S1.wav* der Mandoline gefaltet.

Ein subjektiver Hörtest der Faltungsergebnisse<sup>74</sup> bestätigt den Eindruck, dass der Hals-PU besser geeignet zu sein scheint, da das Ergebnis ausgewogener und präsenter wirkt. Es kann hierbei keine allgemeine Empfehlung für die Wahl des „richtigen“ PUs gegeben werden, da kein Vergleich vorliegt, wie ein Single Coil in der Stegposition im Vergleich zu der Halsposition klingt. Hinzu kommt, dass auch die Vergleichbarkeit zu einem Humbucker in Halsposition fehlt. Somit lässt sich nicht vollends verifizieren, ob sich das „bessere“ Ergebnis allein durch die Bauform, die Position oder aus beiden Gründen ergibt. Aufgrund der in Kapitel 3.1.1 diskutierten Eigenschaften eines Single Coil-PUs (höhen-lastigerer Klang und mehr „Brillanz“ im Vergleich zum Humbucker), wäre ein auditiver Vergleich dieser Bauart in verschiedenen Positionen interessant. Für diese Arbeit wird festgehalten, dass mit den vorhandenen

---

<sup>73</sup> Siehe dazu Kapitel 4.1

<sup>74</sup> Vgl. *yt\_Mando\_S1xChords\_BPU.wav* mit *yt\_Mando\_S1xChords\_NPU.wav*

Tonabnehmer-Konfigurationen der Single Coil in Halsposition ansprechendere Ergebnisse liefert, weswegen für weitere Untersuchungen diese Konfiguration gewählt wird.

Das bisherige Faltungsergebn lässt zudem erkennen, dass die in Kapitel 5.2.4 festgestellte und stark ausgeprägte Resonanzfrequenz bei etwa 590 Hz im Ergebnis der Faltung hörbar ist. Dies lässt sich bei der graphischen Darstellung des Spektrums visualisieren:<sup>75</sup>

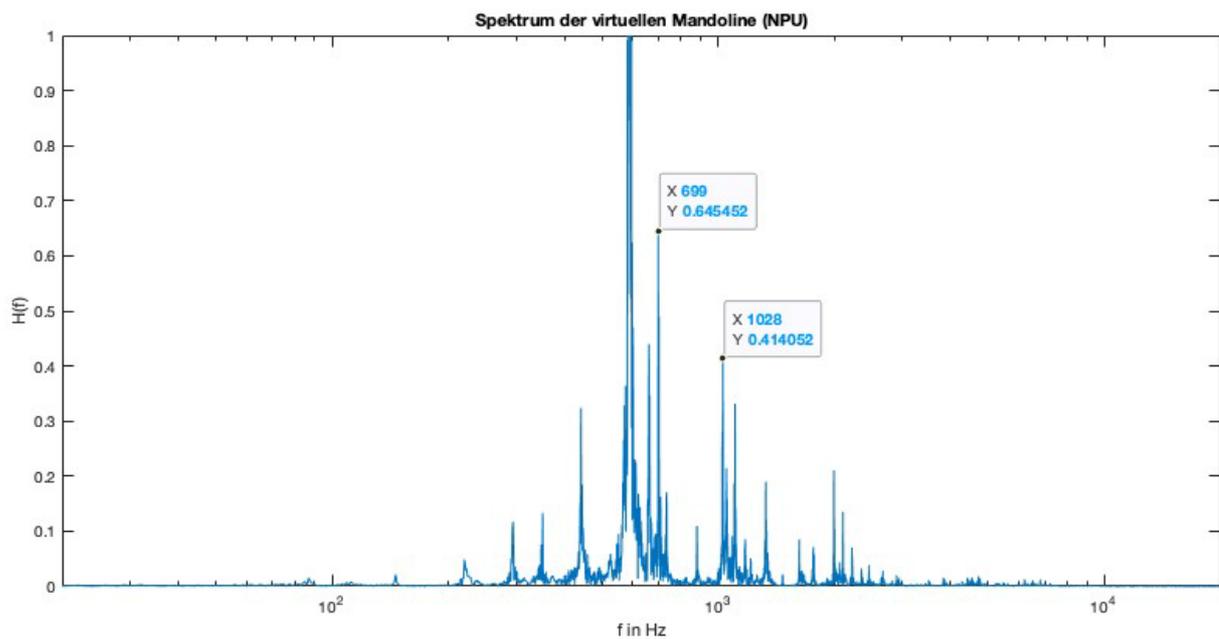


Abbildung 36: Spektrum der virtuellen Mandoline (NPU) [Zoom in].

Die Resonanz bei 590 Hz fällt im Hörtest als störend auf. Wenn die Frequenzgänge des Eingangssignal mit dem des Ausgangssignals verglichen werden, ist festzustellen, dass die tiefen Frequenzanteile (0 – 500 Hz) bei der virtuellen Mandoline weniger stark ausgeprägt sind als beim Generatorinstrument. Dies ist erklärbar durch den kleinen Korpus der Mandoline, welcher aufgrund seiner Größe weniger gut tiefe Frequenzanteile abbilden könne. Dies wirkt sich auf das Übertragungsverhalten aus. Hinzu kommt eine Betonung der hohen Mitten und Höhen, was sich ebenso durch die Bauform der Mandoline erklären ließe. Insgesamt klingt das Faltungsergebnis dem realen Instrument sehr ähnlich. Es fällt die starke Gewichtung der genannten Resonanz auf, welche die Qualität des Ergebnisses beeinträchtigt.

---

<sup>75</sup> Verwendet wurde ein Ausschnitt des Signals `yt_Mando_S1xChords_NPU.wav` über 1 s.

Anlass für weitere Analysen sei der Vergleich verschiedener Tonabnehmer in verschiedenen Positionen. Beispielhaft sei ein Vergleich von Single Coil-PU's in den drei Positionen einer „klassischen“ Stratocaster E-Gitarre (Hals, Mitte, Steg).

Im Folgenden wird ein Vergleich zwischen den Sensor- und Mikrofonsignalen gezogen. Für die weitere Untersuchung werden Eingangssignale genutzt, welche mit dem Single Coil in Halsposition aufgenommen wurden.

### 6.3.2 Vergleich der Messungen von Mikrofon und Sensor

Zum Vergleich der aufgenommenen Impulsantworten wird das Eingangssignal *xt\_REM\_NPU.wav* mit den Signalen *ht\_Mando\_M2.wav* und *ht\_Mando\_S1.wav* gefaltet, um Unterschiede zwischen den Mikrofon- und Sensoraufnahmen hörbar zu machen. Die erste genannte Impulsantwort wurde mit dem Messmikrofon aufgezeichnet, wohingegen die zweitgenannte Aufnahme mit dem Beschleunigungssensor entstanden ist.

Vermutet wird, dass geringe räumliche Anteile bei dem Ergebnis der Faltung mit dem Mikrofon signal hörbar sind. Diese Raumanteile können sich auf das qualitative Ergebnis der virtuellen Mandoline auswirken, wenn frühe Reflexionen Kammfilter-Effekte hervorrufen, die je nach Laufzeitlänge des Schalls bestimmte Frequenzen absenken oder auslöschen und andere wiederum verstärken. Unter Berücksichtigung des Auftretens des Kammfiltereffektes wird ein subjektiv „besseres“ Ergebnis durch die Faltung der Impulsantwort, aufgenommen mit dem Sensor, erwartet.

Der Hörtest beider entstandenen Signale bestätigt diesen Eindruck.<sup>76</sup> Das „Mikrofon-Signal“ klingt „muffiger“ und im Mitten-Bereich „dumpf“. Bestimmte Frequenzen scheinen gedämpft, wohingegen andere im direkten Vergleich mehr hervorstechen. Demnach wird die These bestätigt, dass mit dem Beschleunigungssensor bessere Ergebnisse für diese Untersuchung erzielt werden können. Für ein authentisches Faltungsergebnis wird daher die Verwendung einer Impulsantwort, aufgenommen mit dem Beschleunigungssensor, empfohlen.

---

<sup>76</sup> Vgl. die Aufnahmen *yt\_Mando\_S1xREM\_NPU.wav* und *yt\_Mando\_M2xREM\_NPU.wav*

### 6.3.3 Vergleich und Bewertung der Übertragungsfunktionen

Für den Vergleich des Einflusses der Tonabnehmer der Generatorgitarre sowie für den Vergleich der Aufnahmemethode wurden jeweils bestimmte Impulsantworten der Mandoline gewählt.<sup>77</sup>

Bei der Messung der Impulsantworten der verschiedenen Instrumente wurden mehrere Antworten erfasst und aufgenommen. Für einen direkten Vergleich werden die Impulsantworten S1, S2 und S3 der Mandoline mit dem Eingangssignal *xt\_REM\_NPU.wav* gefaltet. Klanglich unterscheiden sich die Faltungsergebnisse kaum.

Bei der Faltung mit der dritten Impulsantwort, ist das Ausgangssignal etwas leiser zu vernehmen und daher klanglich different. Dies lässt sich auf eine geringere Anschlagstärke des Hammes bei der Messung zurückführen. Qualitativ klingen die drei Versionen ähnlich (wenngleich die Dritte Messung etwas abfällt). Graphisch bestätigt wird die Ähnlichkeit, wenn die ersten zwei gewählten Sensor-Messungen der Mandoline (s. Kapitel 5.2.4) mit der Übertragungsfunktion des Signals *ht\_Mando\_S3.wav* verglichen werden (vgl. Abbildung 28 und Abbildung 29 mit Abbildung 37).

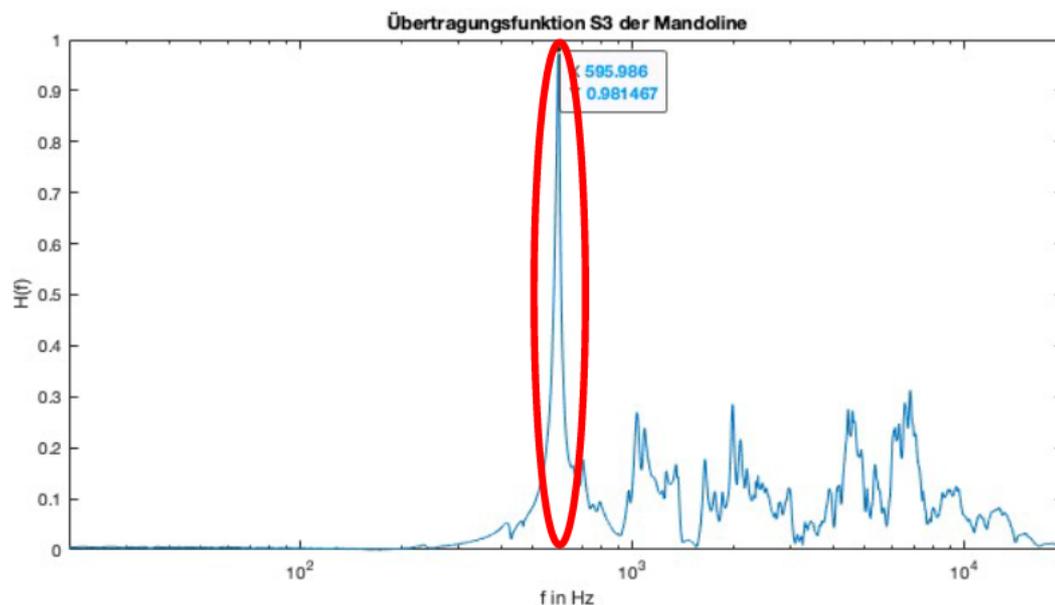


Abbildung 37: Übertragungsfunktion der Mandoline, aufgenommen mit Sensor (S3).

<sup>77</sup> *ht\_Mando\_S1.wav* und *ht\_Mando\_M2.wav*

Auch die dritte gewählte Messung zeigt eine hohe Ähnlichkeit im Spektrum zu den ersten beiden. Zwar unterscheiden sich einzelne Peaks minimal in der Ausprägung, dennoch scheinen dieselben Frequenzen zu resonieren. Somit klingen die Faltungsergebnisse kaum unterscheidbar, weswegen sich die drei Messergebnisse qualitativ ähneln. Auffällig ist die stark ausgeprägte Resonanz zwischen 590 – 600 Hz, welche bereits bei den ersten zwei Messergebnissen und unabhängig von der Aufnahmemethode erkennbar war. Diese ist nicht nur graphisch sichtbar, sondern im Faltungsergebnis auch hörbar<sup>78</sup> (insbesondere, wenn Noten angespielt werden, deren Grundton oder Harmonischen den genannten Frequenzbereich betreffen). In der zeitabhängigen Darstellungsform der DAW sind die Amplituden in Abbildung 38 sehr gut sichtbar:

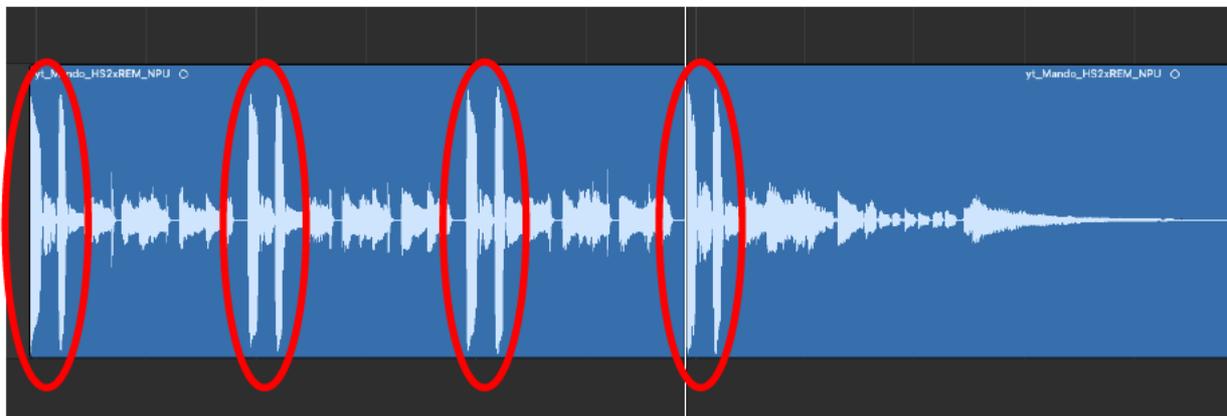


Abbildung 38: Wellenform der Datei *y(t)\_Mando\_S3xREM\_NPU.wav*

Jeder diese „Ausschläge“ entsteht beim Anspielen der Note *d*. Genauer gesagt beim Anspielen eines D5s, dessen Grundton eine Frequenz von ca. 587 Hz besitzt.<sup>79</sup> Da diese Note unnatürlich stark betont wird und teilweise Übersteuerung verursacht, wird das Ergebnis der Faltungsoperation negativ beeinträchtigt. Das virtuelle Instrument klingt „dröhnend“ und weniger authentisch durch die übermäßige Betonung bestimmter Frequenzbänder, hervorgerufen durch einzelne Resonanzen.

Wie bereits erörtert ließe sich diese Resonanz durch das Auftreten einer stark ausgeprägten Mode (0,0) erklären. Da die Ausprägung von Moden vom verwendeten Material und Bauteilen abhängt, könnte eine solch starke Resonanz ein negatives Qualitätsmerkmal der Mandoline sein. Weil zum Zeitpunkt der Messung keine zweite Mandoline zur Verfügung stand, kann

---

<sup>78</sup> Vgl. *yt\_Mando\_S3xREM\_NPU.wav*

<sup>79</sup> Vgl. (Wikipedia, 2022)

diese These jedoch nicht verifiziert werden. Dies sei Anlass für tiefere Untersuchung mit einer zweiten Mandoline.

Dennoch kann mit Hilfe eines Notch-Filters die genannte Frequenz gedämpft werden, sodass sich ein ausgewogeneres Klangbild ergibt. Nach dem Importieren der Datei *yt\_Mando\_S1xREM\_NPU.wav* in die DAW Logic wird mit Hilfe eines digitalen EQs ein Filter bei *590 Hz* eingestellt, mit einer starken Dämpfung von *12 dB* und einer Güte von  $Q = 3$ . Mit dieser Bearbeitung lassen sich hörbar bessere Ergebnisse erzeugen, welches bereit sehr nah an den Klang einer realen Mandoline kommen.<sup>80</sup>

Zusammenfassend ist eine klangliche digitale Nachbearbeitung des Faltungsergebnisses der virtuellen Mandoline nicht wünschenswert. Besser sei, eine Impulsantwort zu erhalten, welche ohne weitere Bearbeitungsschritte ein authentisches Faltungsergebnis erzeugt. Dennoch kann das Ausgangssignal mit anschließender Filterung als hörbar verbessertes Ergebnis betrachtet werden. Das Eingangssignal wurde erkennbar verändert und klingt sehr nahe den charakteristischen Eigenschaften einer Mandoline.

#### 6.3.4 Bewertung der Faltungsergebnisse

Zusammenfassend die Faltungsoperation eine valide Möglichkeit der Klangsynthese. Sie ermöglicht die authentische Simulation von Instrumenten. Es seien dabei viele Faktoren zu beachten, welche Einfluss auf das Ergebnis nehmen. Dies fängt bei der Erzeugung des Eingangssignals an. Hier entsteht das Signal durch den Anschlag des Musizierenden. Die erzeugten Saitenschwingungen werden durch die Tonabnehmer in elektrische Spannung gewandelt. Position und Bauart der Tonabnehmer haben Einfluss das Klangergebnis. Für diese Arbeit hat ein Single Coil-PU in der Halsposition das klanglich bessere Ergebnis generiert. Da man die Klangfärbung durch die magnetischen Tonabnehmer im Gesamtergebnis wahrnehmen kann, könnte lediglich eine Entzerrung des Gitarrensigs am Ausgang den Einfluss mindern. Zudem klingen die Faltungsergebnisse je nach Verwendung der Impulsantwort verschieden. Eine reproduzierbarere Messmethode der IR könne helfen, die

---

<sup>80</sup> Vgl. *yt\_Mando\_S1xREM\_NPU\_Filter.wav*

Vergleichbarkeit zu verbessern. Hier sei beispielhaft die Drahtmethode genannt, welche bei gleicher Drahtstärke und Anzupfstelle sich einfacher reproduzieren lässt.<sup>81</sup>

In der qualitativen Bewertung der Ergebnisse, ist die im Vorversuch gefaltete Ibanez-Gitarre auditiv weniger ansprechend. Das Faltungsergebnis<sup>82</sup> klingt wenig überzeugend und viele Resonanzen fallen störend auf. Zur Optimierung wurde daraufhin ein Beschleunigungsaufnehmer als Sensor verwendet, welcher bessere Ergebnis erzielt. Die virtuelle Mandoline klingt dem realen Instrument bereits sehr ähnlich, auch wenn gewisse Faktoren, wie der besondere Klang von Saitenpaaren nicht simuliert werden konnte. Es fallen bei der virtuellen Mandoline Resonanzen auf, welche das Klangergebnis beeinträchtigen. Die korpusbedingte (0,0) Mode der Mandoline scheint eine starke Resonanz zu erzeugen. Daher sei ein Vergleich mit weiteren Mandolinen interessant, um zu erörtern, ob dieselben Resonanzen angeregt werden und wie stark deren Ausprägung ist. Insgesamt kommt der Authentizitätsgrad der virtuellen Mandoline dem einer realen Version sehr nah. Mit Hilfe von digitaler Nachbearbeitung kann das Ergebnis weiter verbessert werden.

Klanglich überzeugt das Ergebnis der virtuellen Hofer-Gitarre<sup>83</sup> am meisten. Das Spektrum des virtuellen Instrumentes wirkt ausgeglichen und der Klang ist der Aufnahme einer akustischen Westerngitarre bereits sehr nahe, sodass diese miteinander verwechselt werden könnten. **Insgesamt lässt sich festhalten, dass mit den verwendeten Methoden bereits gute Ergebnisse erzielt werden können und dass davon ausgegangen wird, mit den erörterten Optimierungspotenzialen, diese weiter zu verbessern seien** (siehe Kapitel 9 „Ausblick“).

Zum Abschluss dieser Arbeit soll eine praktische Anwendungssituation der virtuellen Mandoline erzeugt werden, um Muszierenden einen möglichen Nutzungsbereich zu veranschaulichen. Hierbei soll das Instrument in Echtzeit gefaltet und gespielt werden können. Im Anschluss werden die Ergebnisse in einer Mischung im Kontext weiterer Instrumente bewertet.

---

<sup>81</sup> Vgl. (von Türckheim, 2013, S. 43 ff.)

<sup>82</sup> *yt\_Ibanez\_M1xChords\_NPU.wav* und *yt\_Ibanez\_M2xChords\_NPU.wav*

<sup>83</sup> Vgl. *yt\_Hofer\_S1xREM\_NPU.wav* oder *yt\_Hofer\_S2xREM\_NPU.wav*

## 7 Echtzeit-Anwendung mittels Hardware

Die virtuelle Mandoline soll abschließend nicht Teil einer rein theoretischen Betrachtung bleiben, sondern Musizierenden einen Nutzen bieten. Neben der Anregung, sich mit der Faltung von Instrumenten auseinanderzusetzen, soll diese Arbeit zeigen, wie die diskutierten theoretischen Grundlagen, in Verbindung mit der gesammelten Auswertung, einen Anwendungsbereich schaffen.

Die elektrische Gitarre ist ein vielseitiges und beliebtes Instrument.<sup>84</sup> Die Möglichkeit dieses Instrument zu nutzen, um andere (Saiten-)Instrumente simulieren zu können, eröffnet für Kunstschaffende eine Vielzahl von kreativen Möglichkeiten. Ein Anwendungsbereich der virtuellen Mandoline könne die Echtzeit-Anwendung in Live-Situationen sein. Der hierfür vorgestellte Ansatz bietet in der Theorie die Möglichkeit, jedes Instrument, für das eine Impulsantwort gemessen wird, mit Hilfe einer elektrischen Gitarre simulieren zu können. Die Ergebnisse der Faltungsoperation mögen hierbei divergieren, allerdings ließe sich aufgrund der Artverwandtheit von Saiteninstrumenten die These aufstellen, dass authentischere Ergebnisse mit Akustik-Gitarren, Banjos oder Ukulelen erzielt werden könnten. Dieses weite Feld der Möglichkeiten zu untersuchen, sei ein guter Ansatz für weitere Arbeiten.

Zur Umsetzung der Echtzeit-Anwendung wird die Hardware „Torpedo Captor X“ des französischen Herstellers *Two Notes*<sup>85</sup> verwendet. Im Folgenden wird dieses Gerät vorgestellt und erläutert. Zudem wird darauf eingegangen, welche Vor- und Nachteile es bietet. Als Kriterien der Bewertung seien die Qualität des Ausgangssignals und die Verzögerung des Ergebnisses durch Latenz gegeben.

---

<sup>84</sup> Vgl. (Weidenbach, 2022)

<sup>85</sup> (Two Notes, 2022)

## 7.1 Torpedo Captor X von Two Notes

Der Torpedo Captor X ist ein Mehrzweck-Effektgerät für Gitarrenverstärker. Mit dem „Captor“ ist es möglich einen Gitarren-Röhrenverstärker zu nutzen, ohne eine Lautsprecher-Box zu verwenden. Das Gerät simuliert das Verhalten der Lautsprecher. Es findet auch hier (in Analogie zur virtuellen Mandoline) eine Faltung statt. Eine Lautsprecher-Box für Gitarren-Verstärker besitzt ein Übertragungsverhalten, das wie das Übertragungsverhalten eines Instrumentes gemessen und genutzt werden kann. Somit entspricht der Captor einer virtuellen Lautsprecher-Box, mit dem zusätzlich (virtuelle) Räume und Mikrofone simuliert werden. In der Signal-Kette wird das Eingangssignal der elektrischen Gitarre durch den Gitarrenverstärker verstärkt und (nicht-linear) verformt. Im Anschluss wird dieses Signal an den Captor weitergegeben, welcher das analoge Signal digitalisiert und faltet. Das Ausgangssignal kann darauf mittels XLR-Kabel an ein Interface oder in Live-Situationen direkt an ein Mischpult und somit an die Beschallungsanlage fließen.<sup>86</sup> Dies gestaltet eine Live-Anwendung einfach und variabel (siehe Abbildung 39).

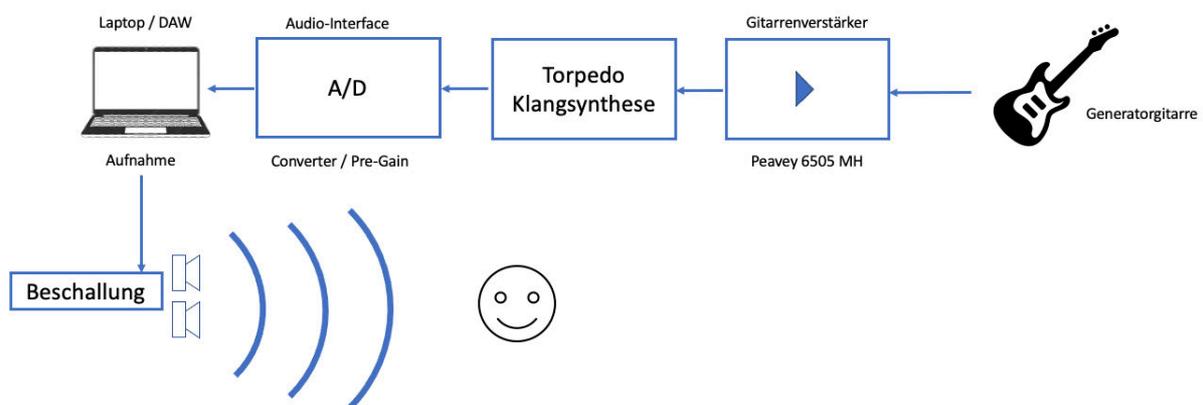


Abbildung 39: Signalweg der Echtzeit-Realisierung

Der Captor ist nicht allein eine virtuelle Lautsprecher-Box, sondern auch eine „Reactive Load Box“. Das bedeutet, dass ein Röhrenverstärker genutzt werden kann, ohne dass er an einen zusätzlichen Lastwiderstand geschaltet werden muss. Dies ist essenziell, da Röhrenverstärker einen Lastwiderstand benötigen, um die (elektrische) Energie der Verstärker-Endstufe weitergeben zu können. Der Captor fungiert hier als „Dummy“ für den benötigten Lastwiderstand. Zudem kann mit Hilfe eines „Attenuators“ die Ausgangsleistung angepasst

<sup>86</sup> Vgl. (Two Notes, 2022)

werden. Damit ist es möglich einen Gitarren-Amp mit hoher Verstärkungsstufe zu spielen, ohne einen entsprechenden Lautstärkepegel zu erzeugen. Zudem stehen einige Effekt-Optionen wie Hall, EQ oder ein Noise-Gate zur Verfügung (Two Notes, 2022).

Für die Live-Anwendung ist die Funktion des „IR Loaders“ am interessantesten, da sich mit Hilfe dieser Funktion eine aufgenommene Impulsantwort importieren lässt, mit der das Eingangssignal gefaltet wird. Hauptsächlich soll hiermit ein Lautsprecher simuliert werden. Wenn der Lautsprecher als übertragendes System verstanden wird, kann stattdessen genauso jedes beliebige Übertragungssystem verwendet werden. Da die Mandoline das übertragende System dieser Untersuchung darstellt, wird die gemessene Impulsantwort des Instrumentes genutzt, um die virtuelle Mandoline mit Hilfe des Captors zu simulieren.

Hierfür werden eine elektrische Gitarre als Generatorinstrument, ein Röhrenverstärker, der Torpedo Captor X sowie ein Audio-Interface und eine DAW benötigt. Für Live-Situationen können Interface und DAW durch ein Mischpult ersetzt werden. Des Weiteren sind Klinken- sowie XLR-Kabel und Stromversorgung für die technischen Geräte notwendig.

Der Captor besitzt in der verwendeten Variante einen Lastwiderstand von  $8 \Omega$  und verspricht laut Hersteller eine minimale Latenz von ca.  $1,2 \text{ ms}$ . Die Analog-/Digitalwandlung geschieht bei  $24 \text{ Bit}$ , mit einer Abtastrate von  $96 \text{ kHz}$ .<sup>87</sup>

## 7.2 Anwendung im Live-Setting

### 7.2.1 Voraussetzungen und Probleme der Methode

Für die Anwendung der virtuellen Mandoline, wird die im vorherigen Kapitel erläuterte Signalkette verwendet. Folgende Technik wird verwendet:

- Elektr. Gitarre: Fender Lonestar Mex. Stratocaster 2013 (HSS)
- Röhrenverstärker: Peavey 6505 MH
- IR Loader: Two Notes Torpedo Captor X
- Interface: Scarlett 2i2

---

<sup>87</sup> Vgl. (Two Notes, 2022)

- Digital Audio Workstation: Logic Pro X, Version 10.7.1
- Hardware: Apple MacBook Air 2015; macOS Monterey, Version 12.1

Die hier vorgestellte Anwendung ist ein Weg der Umsetzung für Gitarristen. Weitere Möglichkeiten seien die Verwendung anderer Hardware, welche die Möglichkeit besitzt Impulsantworten zur Faltung zu nutzen oder die Realisierung über Software. Beispielhaft sei hier Simulink als Zusatzsoftware zu MATLAB genannt, mit dessen Hilfe sich physikalische Modelle simulieren lassen, vgl. (MathWorks, 2022).

Die vorgestellte Methode bringt den Nachteil mit sich, dass das Signal des Generatorinstrumentes eine elektrische Verstärkung benötigt, bevor das Signal im Captor verwertet werden kann. Da der Captor für das Betreiben von Gitarrenverstärkern ohne Lautsprecher entwickelt wurde, wird ein Amp vorgeschaltet, der einen klanglichen Einfluss auf das Gitarrensinal nimmt. Somit kommt es, im Gegensatz zur Software-Faltung, zur Verzerrung des Gitarrensinal. Gitarrenverstärker fügen zusätzliches Rauschen hinzu, was die Qualität des Ausgangssignals ebenso beeinträchtigt. Da der hier verwendete Amp ein Röhrenverstärker ist, welcher für den Einsatz im Metal-Genre entwickelt wurde, tritt bereits bei geringer Verstärkung ein Verzerrungseffekt auf. Röhrenverstärker reagieren zudem dynamisch und damit nicht-linear auf die Stärke von Anschlägen der Gitarre. Das bedeutet, dass sie ein dynamisches Verzerrungsverhalten aufweisen.<sup>88</sup> Diesen Nachteil der Anwendungsmethode ließe sich mit der Verwendung eines Transistor-Verstärkers reduzieren. Transistorverstärker besitzen einen höheren Signal-Rauschabstand und geben das Signal weitestgehend unverfälscht wieder.<sup>89</sup>

Ein Vorteil der Methode ist, dass sie im Privaten oder bei öffentlichen Auftritten mit den bestehenden Gitarren und Verstärkern genutzt werden kann. Zwar obliegt die Qualität des schlussendlichen Ausgangssignals den verwendeten Gitarren und Verstärkern, jedoch ist es mit der Verwendung des Captors für jeden Gitarristen möglich, die Impulsantwort eines Instrumentes zur Faltung zu nutzen. Dafür wird empfohlen, ein möglichst cleanes Signal des Amps zu verwenden. Schon bei geringer Verzerrung würde diese im Faltungsergebnis hörbar sein. Diese Klangverfälschung entsteht durch die Erzeugung zusätzlicher Teiltöne durch den

---

<sup>88</sup> Vgl. (Herbst, 2016, S. 135 ff.)

<sup>89</sup> Vgl. (Delamar, 2022)

Amp. Dies führt zu einer Modifikation der Wellenform, bei der leise Klanganteile angehoben werden. Diese Kompression des Signals wird weiterhin bedingt, durch das „Abschneiden“ von Pegelspitzen einzelner Amplituden. Dieser Effekt ist bei Gitarristinnen und Gitarristen häufig gewünscht. Für diese Untersuchung ist er hinderlich, da das Ausgangssignal nicht verfälscht werden soll. Transistorverstärker arbeiten hingegen mit weniger Spannung als Röhren-Amps. Das Signal bleibt unverzerrt, bis ein Grenzwert überschritten wird. Zusätzlich besitzen Transistorverstärker geringere Innenwiderstände, was eine größere „Klangtreue“ zum Eingangssignal ermöglicht.<sup>90</sup> Somit wird für die Anwendung der Methode empfohlen, ein möglichst cleanes Signal eines Transistor-Amps zu benutzen. Inwiefern die Nutzung eines Röhrenverstärkers einen Nachteil darstellt, zeigt die anschließende Live-Anwendung.

### 7.2.2 Analyse der Anwendung in Echtzeit

Zur Anwendung wird die Impulsantwort *ht\_Mando\_S1.wav* der Mandoline genutzt. Der Captor kann mittels Software gesteuert werden, eine Verbindung wird mit einem USB-Kabel hergestellt. Die Software *Torpedo Remote V5* bietet die Möglichkeit Impulsantworten zu importieren und diese dann auf den Captor zu übertragen. Dieser faltet das Eingangssignal des Gitarrenverstärkers mit der geladenen IR und überträgt das Ausgangssignal via XLR-Kabel an das Scarlett-Audiointerface. Das erhaltene Signal kann darauf mit einer DAW in Echtzeit wiedergegeben und aufgenommen werden.

Für das Importieren einer Impulsantwort stellt der Captor mehrere Optionen zur Verfügung. Zum einen kann die Länge der IR bestimmt werden, zum anderen kann ausgewählt werden, ob die Rechenkapazität genutzt werden soll, um möglichst wenig Phasenverschiebung oder oder möglichst wenig Latenz zu erzeugen. Da die Option „Min. phase“ genutzt wird, um Phasendifferenzen zu anderen IRs (bei der Nutzung von Stereo-Output) zu verringern, wird diese Option nicht benötigt. Es soll durch geringe Latenz, ein Echtzeitspielgefühl entstehen, deswegen wird die Option „Min. IR latency“ genutzt (siehe Abbildung 40). Diese Option entfernt Stille vor dem ersten Sample der IR. Auf weitere klangbeeinflussende Effekte wird verzichtet.

---

<sup>90</sup> Vgl. (Herbst, 2016, S. 35 - 37)

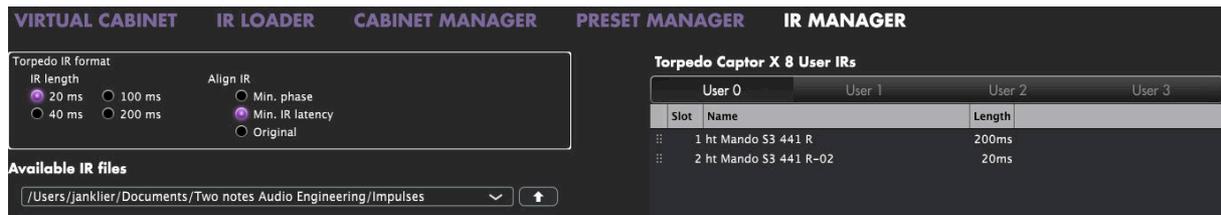


Abbildung 40: Torpedo Remote, IR Manager.

Weiterhin wird die IR mit einer Länge von 200 *ms* (maximal) und mit einer Länge von 20 *ms* (minimal) importiert. Die Ergebnisse werden aufgenommen und verglichen. In der theoretischen Betrachtung besitzt die zeitlich längere IR eine höhere Auflösung, weswegen sie eine bessere Klangqualität erzeugt. Insbesondere tiefe Frequenzen werden dadurch besser abgebildet.<sup>91</sup> Mit 200 *ms* langen IRs werden im Vergleich zehnmal so viele Samplewerte verrechnet, weswegen die Faltungsoperation höhere Latenz hervorruft. Laut Hersteller entstehen folgende Latenzwerte:

- Latency is 1.2ms with IR Length at 20ms
- Latency is 2.2ms with IR Length at 40ms
- Latency is 3.5ms with IR Length at 100ms
- Latency is 4.8ms with IR Length at 200ms<sup>92</sup>

Ein maximaler Latenzunterschied von 3,6 *ms* sollte für den Musizierenden nicht bemerkbar sein, jedoch muss beachtet werden, dass Ein- und Ausgangslatenz des Audiointerfaces und der DAW addiert werden. Dennoch wird vermutet, dass die bessere Auflösung der geringfügig niedrigeren Latenz zu bevorzugen sei.

Ein Hörtest der beiden aufgenommenen Versionen<sup>93</sup> zeigt, dass die klanglichen Unterschiede mit den genutzten 20 *ms* und 200 *ms* Impulsantworten gering ausfallen. Die Version der längeren Impulsantwort klingt etwas „brillanter“, dennoch klingen beide Versionen qualitativ schlechter als die mit MATLAB gefaltete Version des Ausgangssignals. Es ist zu vernehmen, dass die mit dem Captor gefalteten Signale dumpfer klingen, vergleichbar mit einem

<sup>91</sup> (Two Notes, 2022)

<sup>92</sup> (Two Notes, 2022)

<sup>93</sup> *yt\_Captor\_200ms\_Mando.wav* und *yt\_Captor\_20ms\_Mando.wav*

schwachen Radio-Effekt. Zudem ist der hörbare Rauschanteil im Signal deutlich höher, was hauptsächlich auf die Verwendung des Amps zurückzuführen sei. Hier sei es zudem besser, mit einem rauschärmeren Transistorverstärker zu arbeiten, der weniger Verzerrung aufweist. Ein Vergleich mit einem solchen Amp, wäre Anlass für Optimierung, da der Gitarrenverstärker maßgeblichen Einfluss auf den Klang der Generatorgitarre besitzt.

Es wurde ein Setting des Amps verwendet, welches klangbeeinflussende Regler auf die „neutrale“ 12-Uhr Position stellt. Dabei wurde versucht, mit minimaler Vorverzerrung zu arbeiten, was sich mit dem Peavey 6505 MH schwer gestaltet, da der Amp für starke Verzerrung ausgelegt ist. Mit diesem Verstärker kann lediglich eine eingeschränkte Empfehlung für die Echtzeit-Anwendung gegeben werden, da das Signal zu deutlich verzerrt wird. Gerade im Vergleich zur „MATLAB-Version“ fallen diese Unterschiede auf.

Eine signifikante Latenz konnte beim Spielen nicht festgestellt werden, sodass die Echtzeitanwendung der virtuellen Mandoline in diesem Kriterium erfolgreich ist. Dennoch ist auch hier Optimierungspotenzial gegeben, da ein möglichst cleanes Eingangssignal mit hohem SNR zur Faltung mit dem Torpedo Captor X benötigt wird.

Zusammenfassend kann die Klangqualität der Echtzeitanwendung mit dem verwendeten Verstärker nicht überzeugen, da der Klang des Eingangssignals zu deutlich durch den verwendeten Gitarrenverstärker beeinflusst wird. Allerdings wurde die virtuelle Mandoline bisher als Solo-Instrument betrachtet. Da die Mandoline oftmals als Begleitinstrument zu hören ist, wird im nächsten Kapitel untersucht, wie die virtuelle Mandoline im Gefüge einer Musikgruppe klingt und ob sie als authentisch in einer Mischung wahrgenommen wird.

### 7.3 Die virtuelle Mandoline in der Mischung

Zur Kontextualisierung der virtuellen Mandoline wird abschließend betrachtet, wie das Instrument im Gefüge einer Gruppe klingt. Gerade in der Echtzeit-Anwendung ist der alleinstehende Klang des virtuellen Instrumentes nicht vollends überzeugend. Daher kann geprüft werden, inwiefern die virtuelle Mandoline einen authentischen Eindruck in einer Mischung hinterlässt. Dazu wird das Musikstück „Losing my Religion“ (1991) der Gruppe R.E.M. verwendet. In Logic Pro X wird ein Projekt angelegt, für das Schlagzeug, Bass und die

Gesangslinie per MIDI-Dateien importiert werden. Die DAW kann über „Build-in-Sounds“ die verschiedenen Instrumente synthetisieren. Der Gesang wird durch den Klang eines Saxophons abgebildet. Die für das Stück notwendige Akustik-Gitarre und die Mandoline werden als gefaltete Instrumente, mit dem Generatorinstrument eingespielt und verwendet. Genutzt werden die Impulsantwort *ht\_Mando\_S1.wav* der Mandoline sowie die Impulsantwort *ht\_Hofer\_S1.wav* der Hofer-Gitarre. Es entstehen zwei Versionen, eine Mix-Version, erstellt durch die Echtzeit-Faltung mit dem Torpedo Captor X<sup>94</sup> und eine Version, mit in MATLAB gefalteten Signalen<sup>95</sup>.

Für die Echtzeit-Anwendung wird weiterhin der Peavey 6505 MH als Gitarrenverstärker genutzt. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, werden die Impulsantworten mit der Länge 200 ms über Torpedo Remote importiert. Es wird die Option „Min. Latency“ ausgewählt.

Beim Vergleich der entstandenen Mischungen fällt der klangliche Unterschied zwischen den Versionen auf. Der Gitarrenverstärker hinterlässt eine auch in der Mischung erkennbare Färbung der virtuellen Instrumente. Bei der virtuellen Gitarre ist zudem die Verzerrung des gefalteten Signals störend wahrzunehmen. Da ein akustisches Instrument dargestellt werden soll, ist die Zerre hier unerwünscht.

Subjektiv betrachtet, erreichen die in MATLAB gefalteten Instrumente ein besseres Ergebnis. Zusätzlich wäre eine wiederholende Betrachtung interessant, bei der die Echtzeit-Anwendung mit einem nicht verzerrenden Transistorverstärker realisiert wird.

Es fällt auf, dass sich die virtuellen Instrumente von den MIDI-generierten Instrumenten im Mix abheben. Im linken Lautsprecher ist die virtuelle Mandoline hörbar und im rechten die virtuelle Hofer-Gitarre. Alle anderen Instrumente sind im Panorama in der Mitte zu verorten. Zum einen ist dabei die Imperfektion der virtuellen Instrumente, bedingt durch die menschliche Komponente, erkennbar, zum anderen lässt sich eine inferiore Klangqualität zu den MIDI-Instrumenten vernehmen. Allerdings kommen die MIDI-Instrumente dem Ideal einer „makellosen“ Studio-Produktion nahe, weswegen ein Vergleich zu menschlich gespielten und realen Instrumenten interessant sei.

---

<sup>94</sup> *REM\_GesamtMix\_Captor.wav*

<sup>95</sup> *REM\_GesamtMix\_MATLAB.wav*

Da für die Mischung auf signalbeeinflussende Effekte und Audiotbearbeitung zurückgegriffen wurde, werden die einzelnen Spuren der virtuellen Mandoline und Gitarre betrachtet. Für alle Instrumente wird ein EQ, Kompressor sowie ein dezenter Hall-Effekt für einen räumlichen Klang verwendet. Im Vergleich zu den mit dem Captor erzeugten Spuren, ist hörbar, dass die in MATLAB gefalteten Signale ein auditiv authentischeres Ergebnis erzeugen. Besonders bei den einzelnen „Captor-Spuren“<sup>96</sup> ist die Klangfärbung des Verstärkers erkennbar. Dabei ist die Verzerrung des Gitarrensinals ein negativer Effekt. Die „MATLAB-Spuren“<sup>97</sup>hingegen lassen bereits einen sehr guten Authentizitätsgrad erkennen.

Durch die Verwendung eines Equalizers lässt sich die starke Resonanz der Mandoline bei ca. 600 Hz dämpfen und den Frequenzgang ausgeglichener gestalten. Ein Kompressor soll diesen Effekt verstärken. Weiterhin werden bei der virtuellen Mandoline störende Frequenzen bei 1 kHz und 2 kHz abgedämpft. Mit der Signalbearbeitung lässt sich das Ergebnis nochmals verbessern (vgl. *yt\_MATLAB\_Mando\_Mischung.wav*).

Auch die virtuelle Hofer-Gitarre kann in der „MATLAB-Version“ überzeugen (vgl. *yt\_MATLAB\_Hofer\_Mischung.wav*). Hier werden ebenso störende Frequenzen mittels EQ gedämpft und das Klangergebnis mit Hilfe von Kompression und Hall verbessert. Die virtuelle Gitarre kommt dem Klang der realen Version bereits sehr nahe.

---

<sup>96</sup> *yt\_Captor\_200ms\_Hofer\_Mischung.wav* und *yt\_Captor\_200ms\_Mando\_Mischung.wav*

<sup>97</sup> *yt\_MATLAB\_Mando\_Mischung.wav* und *yt\_MATLAB\_Hofer\_Mischung.wav*

## 8 Fazit

Die Faltungsoperation ermöglicht die digitale Klangersynthese von virtuellen Instrumenten. Mit Hilfe von Software wird diese schnell und wirkungsvoll umgesetzt. Dazu werden zwei Signale benötigt, welche den Eingang und das Übertragungsverhalten eines LTI-Systems beschreiben. Für diese Arbeit wurde als Zielsetzung genannt, den Klang einer realen Mandoline mit einer elektrischen Gitarre zu simulieren. Mit Hilfe der Software MATLAB lässt sich die notwendige Rechenoperation und somit die virtuelle Mandoline umsetzen. Die dafür notwendigen Signale müssen generiert und gemessen werden.

Zunächst wird ein Klanggenerator benötigt (das Eingangssignal des Systems), welcher Informationen über die gewählte Tonhöhe und Spielart besitzt. Die dazu genutzte elektrische Gitarre erweist sich als geeignetes Generatorinstrument, obwohl sie mit ihren Tonabnehmern eine klangliche Färbung des Signals erzeugt. Im nächsten Schritt erfolgt die Aufnahme der Impulsantwort des zu simulierenden Instrumentes. Hierfür wird eine neapolitanische Mandoline mit der Impulshammer-Methode angeregt und mittels Beschleunigungsaufnehmer wird das Ergebnis festgehalten und gespeichert werden. Als letzten Schritt werden die aufgenommenen Signale mit Hilfe der Software MATLAB gefaltet. Dies lässt sich zeitlich effizient und effektiv umsetzen.

Auch im Bereich der Live-Anwendung kann die virtuelle Mandoline genutzt werden. Mit Hilfe eines IR-Loaders (*Torpedo Captor X*) wird das Signal eines Gitarrenverstärkers mit der aufgenommenen Impulsantwort der Mandoline gefaltet. Dies ermöglicht eine Echtzeit-Anwendung für Musizierende, da die Umsetzung mit geringer und nicht wahrnehmbarer Latenz erfolgt. Ein Nachteil ist, dass der Gitarrenverstärker das Eingangssignal klanglich verfärbt und den Rauschanteil erhöht. Die Qualität des Ergebnisses ist somit maßgeblich von der Wahl des Gitarrenverstärkers abhängig.

Die errechneten Ausgangssignale der virtuellen Mandoline konnten einen guten Authentizitätsgrad erreichen, auch wenn noch Unterschiede zu den realen Vorbildern feststellbar sind. Besonders die in MATLAB gefalteten Ergebnisse klingen den realen Varianten sehr ähnlich (die zum Vergleich untersuchte Westerngitarre der Marke *Hofer* klingt in ihrer

virtuellen Variante sehr übereinstimmend zum Original). Mit Hilfe von digitaler Nachbearbeitung durch eine DAW ließ sich der Authentizitätsgrad der Ergebnisse steigern, indem EQ genutzt wurde, um störende Resonanzen oder Frequenzbänder zu eliminieren. Es wird zudem empfohlen durch Kompression die Dynamik des Ausgangssignals zu verringern sowie mit Hall-Effekten einen räumlichen Klang zu erzeugen. Durch diese Schritte können klangliche Verbesserungen erreicht werden, es sei aber empfehlenswert eine Optimierung vor der Faltung der Signale anzustreben.

Eine Mischung der erzeugten Ausgangssignale mit weiteren Instrumenten im Stile eines Songs, konnte authentische Ergebnisse liefern. Es ließen sich mit den genutzten Methoden ansprechende und für weitere Untersuchungen inspirierende Ergebnisse erzielen sowie Möglichkeiten zur Anwendung für Musizierende kreieren.

## 9 Ausblick

In dieser Arbeit wurden einige Potenziale zur Verbesserung der Simulation eines virtuellen Instrumentes identifiziert. Bei der Aufnahme des Eingangssignals nehmen wie in Kapitel 3 diskutiert, viele reziproke Faktoren Einfluss auf das Signal des Generatorinstrumentes. Speziell die Wahl des Tonabnehmers besitzt großen Einfluss auf den Klang. Neben Single Coil- und Humbucker-Tonabnehmern gibt es viele weitere Formen, welche unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. In dieser Untersuchung hat der Single Coil-PU einer Fender Stratocaster-Gitarre das klanglich beste Ergebnis erzielt.

Abseits von magnetischen Tonabnehmern gibt es zudem piezoelektrische Tonabnehmer, welche eine andere Wirkweise besitzen und somit eine differente Klangfarbe erzeugen. Anlass für weitere Analysen sei daher die Verwendung eines „Piezos“, welcher zur Generierung eines Eingangssignals verwendet wird. Mit dem anschließenden Faltungsergebnis können Vergleiche zu magnetischen Tonabnehmern gezogen werden, um eine Empfehlung auszusprechen, welches Abnahmeprinzip besser geeignet ist und authentischere Ergebnisse erzielt.

Zusätzlich sollte bei magnetischen Tonabnehmern die Position weitergehend betrachtet werden. Durch das Entstehen von Schwingungsbäuchen und -knoten, ist die Wahl der Position des Tonabnehmers entscheidend für den Klang. Somit sei dies Anlass verschiedene Tonabnehmerpositionen mit verschiedenen -bauweisen zu kombinieren und zu vergleichen.

Um den Einfluss des Generatorinstrumentes auf das Faltungsergebnis weiter zu minimieren, sei die Entzerrung des E-Gitarren-Signals eine weitere Möglichkeit. Zudem ließe sich durch eine 12-saitige E-Gitarre die Saitenpaare einer Mandoline simulieren.

Bei der Aufnahme der Impulsantwort wurde in dieser Arbeit die Impulshammer-Methode verwendet. Mit Hilfe eines Beschleunigungssensors ließen sich valide Ergebnisse erzielen, wengleich die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erschwert wird. Hier können weitere Messtechniken zur Aufnahme der Impulsantwort in Betracht gezogen werden, wie die Drahtseilmethode (vgl. dazu Kapitel 4.2.2). Ein Vergleich der Ergebnisse verschiedener Möglichkeiten zur Messung der Impulsantwort sei ein weiterer Aspekt für tiefergehende Untersuchungen, mit dem Ziel eine Empfehlung für die geeignetste Methode zu finden.

Des Weiteren wird empfohlen ein Vergleich zwischen mehreren Mandolinen anzustreben, da bauteil- und bauformbedingte Resonanzen bei bestimmten Instrumenten auftreten können, welche Einfluss auf den Klang des Ergebnisses besitzen. Die Qualität der hochwertigeren Hofer-Gitarre im Vergleich zur günstigen Ibanez-Gitarre lässt sich im Faltungsergebnis hören, da bestimmte Resonanzen weniger stark angesteuert werden (vgl. Kapitel 5.2.1). Deswegen sei es interessant zu ermitteln, ob die in Kapitel 5.2.4 festgestellte Resonanz der Mandoline von etwa *590 Hz* ähnlich stark bei anderen neapolitanischen Mandolinen ausgeprägt ist.

Auch für die Anwendung im Live-Bereich sind Möglichkeiten zur Verbesserung des Klanges vorhanden. Als hauptsächlicher und maßgeblicher Faktor sei hier die Verwendung eines geeigneten Gitarrenverstärkers genannt. Es wurde die These aufgestellt, dass ein Transistorverstärker aufgrund von geringerer nicht-linearer Verzerrung im Vergleich zu einem Röhrenverstärker besser geeignet sei, um ein möglichst unverfälschtes Eingangssignal zu erzeugen. Dies zu erörtern und verschiedene Verstärker-Modelle zu vergleichen ist ein weiterer Schritt zur Optimierung. Als eine Alternative der Echtzeit-Anwendung sei die Implementierung mittels Software zu nennen, welche keine (ungewollte) Klangfärbung erzeugt. Hierfür ist beispielsweise die Programmierung eines Plug-Ins für eine DAW notwendig, welches die Faltungsoperation bei Eingang eines Gitarrensignals in Echtzeit durchführt und das Signal mit nicht wahrnehmbarer Latenz an den Ausgang des Systems weitergibt. Bei der Minimierung der Latenz ist ein Kompromiss einzugehen, da die Auflösung für eine schnellere Berechnung der Faltung reduziert werden muss, was eine Verringerung der Audioqualität bedeutet.

Schlussendlich lässt sich festhalten, dass die Klangsynthese durch digitale Faltung eine geeignete Methode ist, um Instrumente zu simulieren. Daher sind die genannten Optimierungsmöglichkeiten erstrebenswert zu betrachten, um Faltungsergebnisse weiter zu verbessern. Da in dieser Untersuchung Ergebnisse erzielt werden konnten, welche realen Instrumenten sehr ähnlich klingen, kann davon ausgegangen werden, dass Instrumente noch authentischer simuliert werden können. Dies schafft spannende und inspirierende Anwendungsbereiche für Live-Situation und Aufnahmen, da Musizierende mit ihrem gewohnten Instrument den Klang eines anderen Instrumentes simulieren können und sich neue Möglichkeiten des Schaffens eröffnen.

## Literaturverzeichnis

- Curdt, O. (2022). *Hochschule der Medien Stuttgart*. Von Skript Tonabnehmersysteme 1: <https://curdt.home.hdm-stuttgart.de>; abgerufen am 16.06.2022.
- Delamar. (2022). *Röhre oder Transistor für Gitarre*. Von Delamar: <https://www.delamar.de/gitarre/roehre-oder-transistor-42253/>; abgerufen am 02.08.2022.
- Eckardt, S. (2015). *Nachweis von Hals- und Korpusresonanzen im Ausgangssignal der elektrischen Gitarre*. Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg: Bachelorarbeit (B Sc.).
- Görne, T. (2015). *Tontechnik*. München: Hanser Verlag.
- Herbst, J.-P. (2016). *Die Gitarrenverzerrung in der Rockmusik*. Berlin: LIT.
- Hochschule Karlsruhe. (2022). *Systemtheorie Online: Normierung von Signalen*. Von Hochschule Karlsruhe: <https://www.eit.hs-karlsruhe.de/mesysto/teil-a-zeitkontinuierliche-signale-und-systeme/zeitkontinuierliche-signale/normierung-von-signalen.html>; abgerufen am 07.08.2022.
- Hochschule Karlsruhe. (2022). *Systemtheorie Online: Spektrum eines Signals*. Von Hochschule Karlsruhe: <https://www.eit.hs-karlsruhe.de/mesysto/teil-a-zeitkontinuierliche-signale-und-systeme/spektrum-eines-signals.html>; abgerufen am 07.08.2022.
- Kammeyer, K.-D., & Kroschel, K. (2012). *Digitale Signalverarbeitung*. Wiesbaden: Springer.
- Möser, M., & Feldmann, J. (2010). *Messtechnik der Akustik*. Berlin Heidelberg: Springer.
- MathWorks. (2022). *Simulink*. Von MathWorks: <https://de.mathworks.com/products/simulink.html>; abgerufen am 02.08.2022.
- Mietzner, J. (2020). *Skript der Vorlesung: Digitale Signalverarbeitung*. Hamburg: Hochschule für Angewandte Wissenschaften.
- Pixabay. (2022). *Pixabay*. Von <https://pixabay.com/de/vectors/mandoline-gitarre-saiteninstrument-7280563/>; abgerufen am 15.07.2022.
- Rossing, T. D., & Caldersmith, G. (2010). Guitars and Lutes. In T. D. Rossing, *The Science of String Instruments* (S. 19-45). New York: Springer.
- Rossing, T. D., & Cohen, D. J. (2010). Mandolin Family Instruments. In T. D. Rossing, *The Science of String Instruments* (S. 77-98). New York: Springer.

- Taylor, C. (2013). *Der Ton macht die Physik*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn.
- Thomann GmbH. (2022). *Mandolinen Saiten*. Von Thomann:  
[https://www.thomann.de/de/mandolinen\\_saiten.html](https://www.thomann.de/de/mandolinen_saiten.html); abgerufen am 09.07.2022.
- Two Notes. (2022). *About*. Von Two Notes: <https://www.two-notes.com/en/about/>;  
abgerufen am 01.08.2022.
- Two Notes. (2022). *Torpedo Captor X*. Von Two Notes: <https://www.two-notes.com/en/torpedo-series/torpedo-captor-x/>; abgerufen am 01.08.2022.
- Two Notes. (2022). *Two Notes Wiki*. Von Torpedo Captor X User's Manual: [https://wiki.two-notes.com/doku.php?id=torpedo\\_captor\\_x:torpedo\\_captor\\_x\\_user\\_s\\_manual](https://wiki.two-notes.com/doku.php?id=torpedo_captor_x:torpedo_captor_x_user_s_manual);  
abgerufen am 03.08.2022.
- von Türckheim, F. (2013). *Die virtuelle Violine*. Uelvesbüll: Der Andere Verlag.
- Weidenbach, B. (29. März 2022). *Welche Instrumente spielen Sie?* Von Statista:  
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1288367/umfrage/gespielte-musikinstrumenten-in-deutschland/>; abgerufen am 05.06.2022
- Wikipedia. (2022). *G (musical Note)*. Von Wikipedia:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/G\\_\(musical\\_note\)](https://en.wikipedia.org/wiki/G_(musical_note)); abgerufen am 26.07.2022.
- Wikipedia. (2022). *Frequenzen der gleichstufigen Stimmung*. Von Wikipedia:  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Frequenzen\\_der\\_gleichstufigen\\_Stimmung](https://de.wikipedia.org/wiki/Frequenzen_der_gleichstufigen_Stimmung); abgerufen am 30.07.2022.
- Zollner, M. (2009). *Physik der Elektrogitarre*. Regensburg.

## Abbildungsquellen

Abbildung 1:	(Görne, 2015, S. 137)
Abbildung 2:	(Görne, 2015, S. 138)
Abbildung 3:	Eigendarstellung nach (Mietzner, 2020)
Abbildung 4:	Eigendarstellung nach (Mietzner, 2020)
Abbildung 5:	Eigendarstellung
Abbildung 6:	Eigendarstellung
Abbildung 7:	depositphotos.com
Abbildung 8:	Eigendarstellung nach (Curdt, o. D.)
Abbildung 9:	(Zollner, 2009)
Abbildung 10:	(Zollner, 2009)
Abbildung 11:	(Rossing & Caldersmith, Guitars and Lutes, 2010)
Abbildung 12:	(Zollner, 2009)
Abbildung 13:	(Zollner, 2009)
Abbildung 14:	Eigendarstellung
Abbildung 15:	Eigendarstellung
Abbildung 16:	Eigendarstellung
Abbildung17:	pixabay.com
Abbildung 18:	Eigendarstellung
Abbildung 19:	Eigendarstellung
Abbildung 20:	Eigendarstellung
Abbildung 21:	Eigendarstellung
Abbildung 22:	Eigendarstellung
Abbildung 23:	Eigendarstellung
Abbildung 24:	Eigendarstellung
Abbildung 25:	Eigendarstellung
Abbildung 26:	Eigendarstellung
Abbildung 27:	Eigendarstellung
Abbildung 28:	Eigendarstellung
Abbildung 29:	Eigendarstellung
Abbildung 30:	Eigendarstellung

Abbildung 31:	Eigendarstellung
Abbildung 32:	Eigendarstellung
Abbildung 33:	Eigendarstellung
Abbildung 34:	Eigendarstellung
Abbildung 35:	Eigendarstellung
Abbildung 36:	Eigendarstellung
Abbildung 37:	Eigendarstellung
Abbildung 38:	Eigendarstellung
Abbildung 39:	Eigendarstellung
Abbildung 40:	Eigendarstellung
Abbildung 41:	Eigendarstellung

## Anhang

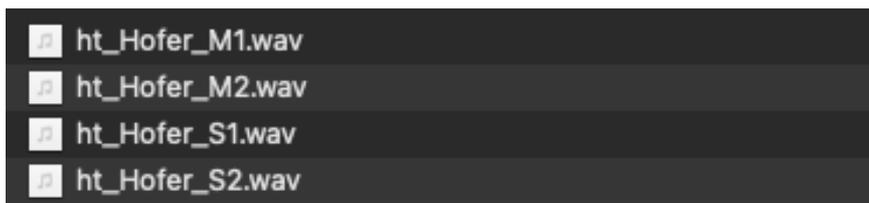
Die folgenden Dateien befinden sich auf dem Datenträger:

xt\_Eingangssignale:

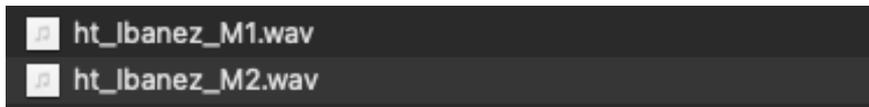


ht\_Impulsantworten:

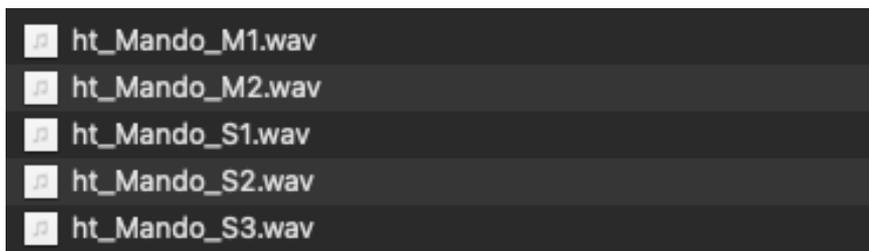
- Hofer-Gitarre



- Ibanez-Gitarre

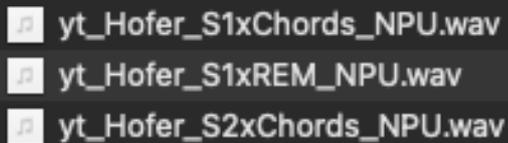


- Mandoline



yt\_Ausgangssignale:

- Hofer-Gitarre



A screenshot of a file explorer showing three audio files for the Hofer-Gitarre. Each file name is preceded by a small square icon containing a musical note symbol.

- yt\_Hofer\_S1xChords\_NPU.wav
- yt\_Hofer\_S1xREM\_NPU.wav
- yt\_Hofer\_S2xChords\_NPU.wav

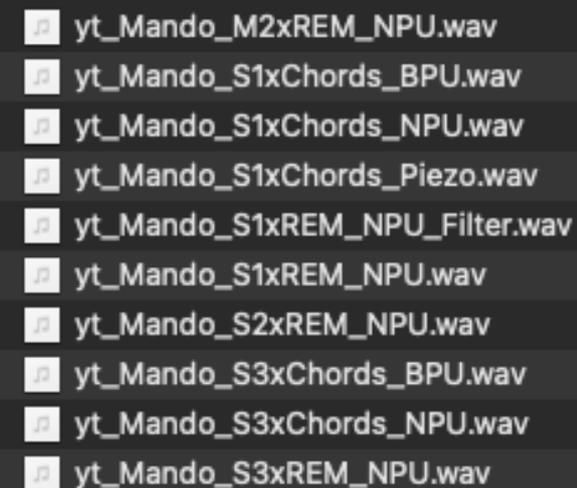
- Ibanez-Gitarre



A screenshot of a file explorer showing two audio files for the Ibanez-Gitarre. Each file name is preceded by a small square icon containing a musical note symbol.

- yt\_Ibanez\_M1xChords\_NPU.wav
- yt\_Ibanez\_M2xChords\_NPU.wav

- Mandoline



A screenshot of a file explorer showing ten audio files for the Mandoline. Each file name is preceded by a small square icon containing a musical note symbol.

- yt\_Mando\_M2xREM\_NPU.wav
- yt\_Mando\_S1xChords\_BPU.wav
- yt\_Mando\_S1xChords\_NPU.wav
- yt\_Mando\_S1xChords\_Piezo.wav
- yt\_Mando\_S1xREM\_NPU\_Filter.wav
- yt\_Mando\_S1xREM\_NPU.wav
- yt\_Mando\_S2xREM\_NPU.wav
- yt\_Mando\_S3xChords\_BPU.wav
- yt\_Mando\_S3xChords\_NPU.wav
- yt\_Mando\_S3xREM\_NPU.wav

Mischung:



A screenshot of a file explorer showing four audio files for the Mischung. Each file name is preceded by a small square icon containing a musical note symbol.

- yt\_Captor\_200ms\_Hofer\_Mischung.wav
- yt\_Captor\_200ms\_Mando\_Mischung.wav
- yt\_MATLAB\_Hofer\_Mischung.wav
- yt\_MATLAB\_Mando\_Mischung.wav

Torpedo Captor X:



A screenshot of a file explorer showing two audio files for the Torpedo Captor X. Each file name is preceded by a small square icon containing a musical note symbol.

- yt\_Captor\_20ms\_Mando.wav
- yt\_Captor\_200ms\_Mando.wav

z\_Mischung:

 REM\_GesamtMix\_Captor.wav

 REM\_GesamtMix\_MATLAB.wav

## Legende

### 1. Signalart

- a. ht: Impulsantwort  $h(t)$
- b. xt: Eingangssignal  $x(t)$
- c. yt: Ausgangssignal  $y(t)$

### 2. Instrument

- a. Hofer: Hofer-Westerngitarre (Modell: HA-JC07)
- b. Ibanez: Ibanez-Westerngitarre (Modell: V72-ECE)
- c. Mando: Neapolitanische Mandoline (Marke unbekannt)

### 3. Aufnahme-Konfiguration

- a. NPU: Neck Pickup der Generatorgitarre
- b. BPU: Bridge Pickup der Generatorgitarre
- c. Piezo: Piezoelektrischer Pickup der Ibanez-Gitarre

### 4. Aufnahmeform der Impulsantwort

- a. S1: Erste Sensormessung
- b. S2: Zweite Sensormessung
- c. M1: Erste Mikrofonmessung
- d. M2: Zweite Mikrofonmessung

### 5. Inhalt

- a. Chords: Akkordfolge (Dm-Am-Gm/B-F/C)
- b. REM: Intro und Vers des Songs „Losing my Religion“ von REM (1991)

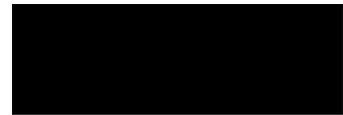


Abbildung 41: Versuchsdurchführung im ET-Labor der HAW Hamburg.

## Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Virtuelle Mandoline – Klangsynthese durch digitale Faltung“ selbständig 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. Diese Arbeit hat in gleicher und ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum



Unterschrift