

Angewandte Kunst Schneeberg

Fakultät der Westsächsischen Hochschule Zwickau
Studiengang Musikinstrumentenbau Markneukirchen

Bachelorarbeit zum Thema:

Einfluss des Halsholzes auf Klang und Sustain eines elektrisch verstärkten Zupfinstruments

Zur Erlangung des Grades Bachelor of Arts

Vorgelegt von:

Raphael Herzberg

Seminargruppe: 172005

Matrikelnummer: 38673

Eingereicht am 5. Juli 2021

Studiengang Musikinstrumentenbau Markneukirchen

Angewandte Kunst Schneeberg

Fakultät der Westsächsischen Hochschule Zwickau

Erstgutachter: Prof. Eberhard Meinel

Zweitgutachter: Prof. Dr. Hannes Vereecke

Abstract

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, sowohl die gängigsten bei E-Gitarren zum Einsatz kommenden Hölzer zur Halsfertigung auf ihren klanglichen Einfluss als auch den Einfluss zum Einsatz kommender Hals- und Korpushölzer auf das Sustain der erregten Saiten zu untersuchen. Dazu wurden Frequenzspektren anhand dreier vermessener Testhälse vergleichend auf Abweichungen ihres Teiltonaufbaus untersucht und die durchschnittliche Abklingzeit einzeln angeregter Leersaiten anhand der drei Testhälse und zusätzlicher acht Testkorpusse vergleichend ausgewertet. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Halshölzer einen nur sehr geringen, zu vernachlässigenden Einfluss auf den Klang haben, die Hals- und Korpushölzer aber sehr wohl das Sustain beeinflussen können.

Die Bachelorarbeit ist sowohl für Studierende des Musikinstrumentenbaus und ausgebildete Gitarrenbauer als auch leidenschaftliche und professionelle Gitarrenspieler interessant.

Inhaltsverzeichnis

1	Themenfindung	1-1
1.1	Motivation	1-1
1.2	Zielstellung	1-1
1.3	Lösungsweg	1-2
2	Arbeitsplan	2-3
3	Stand der Forschung	3-4
3.1	Klang – Der Versuch einer Definition	3-8
3.2	Was ist Sustain?	3-9
4	Material und Methoden	4-10
4.1	Planung und Bau des Testinstruments	4-10
4.1.1	Planung	4-10
4.1.2	Bau der Testhülse	4-11
4.1.3	Bau des Korpus und seiner Bestandteile	4-12
4.2	Messverfahren	4-12
4.2.1	Bestimmung der Materialeigenschaften	4-13
4.2.2	Messverfahren zur Bestimmung des Einflusses auf den Klang	4-16
4.2.3	Messverfahren zur Bestimmung des Einflusses auf das Sustain	4-20
4.3	Fehlersuche und -reduzierung	4-23
4.3.1	Testinstrument	4-23
4.3.2	Audioaufnahmen	4-23
5	Ergebnisse und Diskussion	5-25
5.1	Auswertung der Materialeigenschaften der Halshölzer	5-25
5.1.1	Lucchimeter	5-25
5.1.2	Zweipunktübertragungskurve	5-31
5.2	Einfluss der Halshölzer auf den Klang: Auswertung der Frequenzspektren	5-33
5.2.1	Auswertung der Frequenzspektren anhand der g- und e'-Leersaiten	5-33
5.2.2	Auswertung der Frequenzspektren anhand der a'- und c'-Leersaiten	5-37

5.3	Einfluss der Halshölzer auf das Sustain: Auswertung der Audiosignale	5-42
5.3.1	Sustain – Einfluss der Halshölzer	5-43
5.3.2	Sustain – Einfluss des Korpusholzes	5-45
6	Fazit und Ausblick	6-48
7	Literatur-/ Quellenverzeichnis.....	I
	Abbildungsverzeichnis.....	III
	Tabellenverzeichnis.....	V
	Selbständigkeitserklärung	1
8	Anhang	1

1 Themenfindung

1.1 Motivation

Gegenstand dieser Bachelorarbeit ist es, den Einfluss verschiedener Halshölzer auf den Klang und das Sustain, also den Pegelabfall der gespielten Saite, eines elektrisch verstärkten Zupfinstruments zu untersuchen. Das Augenmerk soll hierbei auf der Verwendung und Vermessung der gängigsten bei E-Gitarren zum Einsatz kommenden Hölzer für die Halsfertigung liegen, um hier gegebenenfalls Unterschiede des Klangs und des Sustains zwischen den Halshölzern am spielfertigen Instrument nachweisen zu können. Bei der Wahl der Hölzer werden lediglich die gängigsten Halshölzer untersucht und vermessen: Ahorn, Mahagoni (in diesem Fall Khaya Mahagoni) und Erle.

Zur Vervollständigung und ergänzend zur eigenen Studie zum „*Einfluss des Korpusholzes auf den Klang eines elektrisch verstärkten Zupfinstruments*“ (Herzberg 2021) wird zusätzlich der Einfluss des Korpusholzes auf das Sustain beleuchtet. Dafür werden die bereits durchgeführten Messungen, welche an acht Korpussen aus acht verschiedenen Hölzern durchgeführt wurden, und deren Messdaten aufgearbeitet und ausgewertet.

Gegenstand dieser Arbeit ist es nicht, den Einfluss der Saiten oder anderer Bestandteile des Instruments zu untersuchen und zu dokumentieren.

1.2 Zielstellung

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, die Merkmale und Unterschiede der zur Verwendung kommenden Halshölzer anhand von Messungen und unter Einbeziehung der Literatur und dem aktuellen Forschungsstand zu untersuchen und zu dokumentieren. Untersuchungen am spielfertigen Instrument und die Auswertung dadurch gesammelter Messdaten sollen abschließend Aufschluss darüber geben, ob und in welchem Ausmaß klangliche Abweichungen nachzuweisen und ggf. zu hören sind. Darüber hinaus soll mit der Auswertung der gesammelten Messdaten Klarheit geschaffen werden, ob und in wie weit sich das Sustain, also in diesem Fall die Abklingzeit der angezupften Leersaiten, bei der Verwendung verschiedener Hals- und Korpushölzer unterscheidet.

1.3 Lösungsweg

Ausgangspunkt zur Realisierung dieser Arbeit ist die Beschaffung der in Frage kommenden und oben bereits erwähnten Hölzer und der zusätzlichen Bestandteile (Halsspannstäbe, Obersättel, Griffbretter und Mechaniken) zur Fertigung der Testhälse. Der Korpus sowie dazugehörige Bestandteile liegen zu Beginn dieser Arbeit vor, da diese bereits Gegenstand der Projektarbeit „*Einfluss des Korpusholzes auf den Klang eines elektrisch verstärkten Zupfinstruments*“ (Herzberg 2021) waren und übernommen werden können. Die zur Verwendung kommenden Halshölzer werden anfangs mit dem *Lucchimeter* auf ihre Materialeigenschaften untersucht, fertiggestellt und der Frequenzgang jedes Testhalses mittels des *Ono Sokki FFT Analyzer CF-7200* bestimmt.

Um der Kernfrage nachkommen zu können, ob und inwieweit die verschiedenen Halshölzer für Unterschiede im Klang und Sustain verantwortlich gemacht werden können, werden am spielfertigen Instrument Audiosignale der einzeln angezupften Leersaiten aufgenommen. Das Anzupfen der Leersaiten erfolgt automatisiert über ein Plektrum, welches in eine eigens gebaute mechanische Anzupfvorrichtung eingespannt ist und ein gleichbleibend reproduzierbares Anzupfen der Saiten ermöglichen soll. Diese Aufnahmen erfolgen über einen mit dem PC verbundenen Gitarrenverstärker (*Boss Katana-Air*) und dem Programm *Audacity*. Die Audiosignale werden anschließend einer Frequenzanalyse unterzogen, um daraus mittels der Programmumgebung *Matlab* Frequenzspektren graphisch erstellen zu können, welche Aufschluss über klangliche Unterschiede geben sollen. Um eine Aussage über Unterschiede des Sustains fällen zu können, wird die Abklingzeit der einzeln angezupften Leersaiten ausgewertet.

Als Testinstrument wird hier ein Eigenentwurf bzw. eine Eigenkonstruktion einer elektrisch verstärkten Tenor Ukulele zum Einsatz kommen, die sich in Form und Bauweise an der ‚*Fender Telecaster*‘ orientiert. Diese Bauweise hat den entscheidenden Vorteil einer verschraubten Hals-Korpus-Verbindung, sodass lediglich ein Testkorpus mit den dazugehörigen Bestandteilen benötigt wird, welcher mit den drei Testhälsen beliebig kombiniert werden kann. So können Materialschwankungen seitens des Korpus bereits ausgeschlossen werden. Die Hälse werden darüber hinaus nicht vollends ausgeformt, um auch hier die Wahrscheinlichkeit auftretender Fehler zu reduzieren.

2 Arbeitsplan

Zu Beginn dieser Bachelorarbeit liegt das Augenmerk auf der Planung eines geeigneten Testinstruments und der Klärung der Frage, wie viele Hälse aus welchen Hölzern für die geplanten Messungen gebaut werden sollen. Daraufhin werden die benötigten Materialien zusammengetragen und mit dem Bau der Testhälse begonnen. Die Halsrohlinge werden anfangs einheitlich ausgearbeitet, um mit dem *Lucchimeter* vermessen werden zu können. Die erfassten Daten werden mit der am *Studiengang Musikinstrumentenbau* extra dafür angelegten *Excel* Datei „*Vorlage Erfassung Material und Geometriedaten Gitarre und Violine*“ ausgewertet. Die so erhaltenen Materialeigenschaften der Halshölzer werden folgend dokumentiert und in Diagrammen visualisiert und verglichen. Daraufhin können die Testhälse fertiggestellt und die Frequenzgänge bzw. die Zweipunktübertragungskurven mittels des *Ono Sokki FFT Analyzer CF-7200* aufgezeichnet werden, um das Schwingungsverhalten beobachten zu können. Die ermittelten Daten werden daraufhin mit dem Programm *Matlab* visualisiert und ausgewertet.

Vor Beginn der Aufnahmen der Audiosignale muss eine geeignete Anzupfvorrichtung gebaut, um ein einheitliches Anzupfen der Leersaiten gewährleisten zu können, und eine Lösung für eine einheitliche Lagerung des Instruments während dieses Anzupfvorgangs gefunden werden. Daraufhin können die Audiosignale der einzeln angezupften Leersaiten des Testinstruments, in Kombination mit dem jeweiligen Testhals, in mehreren Messreihen aufgenommen und mit *Audacity* und *Matlab* weiterverarbeitet werden. Die gesammelten Daten und der Messaufbau werden einer umfangreichen Fehleranalyse unterzogen und anschließend ausgewertet.

Die einzelnen Bauschritte und Messungen werden fotografisch festgehalten und jeweils zeitnah in Bild und Text dokumentiert. Der Prozess der Literaturrecherche und -auswertung wird begleitend zur praktischen Umsetzung der Bachelorarbeit durchgeführt und schriftlich ausgearbeitet. Nach Abschluss der praktischen Durchführung des Baus und der Messreihen kann die Dokumentation und Auswertung der gesammelten Daten erfolgen.

3 Stand der Forschung

In der Literatur lassen sich zahlreiche Arbeiten finden, die sich sowohl mit dem Gegenstand der elektrischen als auch akustischen Gitarre und darüber hinaus mit elektrischen Bassgitarren beschäftigen. Neben den konstruktiven und rein optischen Unterschieden der akustischen und elektrischen Gitarre fällt auch die Schallerzeugung unterschiedlich aus: Im Namenszusatz – ‚elektrisch‘ und ‚akustisch‘ – der beiden Gitarrentypen erkennt man schon auf den ersten Blick, wie das Instrument funktioniert. Während der elektrischen Gitarre „*lediglich die Aufgabe zukommt, das Saitensignal zu erzeugen*“ (Fleischer 1998, S. 106) und „*elektroakustische Mittel zur Hilfe genommen werden, um das Saitensignal in Schall umzusetzen, wird bei einer akustischen Gitarre der Korpus als Abstrahlkörper genutzt.*“ (Fleischer 1998, S. 106).

Fleischers Studie zu „*Schwingungsuntersuchungen an elektrischen Gitarren*“ (2001) zeigt grundlegende Unterschiede zwischen akustischen und elektrischen Gitarren im Hinblick auf die Auflager der Saiten. Fokus dieser Studie ist, wie schnell die Saitenschwingung abklingt, also in welchem Maße die Auflager die Saiten bedämpfen (s. Abbildung 1). Fleischer kommt hier zum Ergebnis, dass bei der akustischen Gitarre vor allem der Steg und bei der elektrischen Gitarre vor allem der Hals in großem Maße mitschwingt und dadurch die Saitenschwingung bedämpft (vgl. Fleischer 2001, S. 83). Schon 1997 rückt Fleischer in „*Admittanzmessungen an akustischen Gitarren*“ das untere Steg-Ende bei akustischen und das obere Hals-Ende bei elektrischen Gitarren in den Mittelpunkt des Interesses.

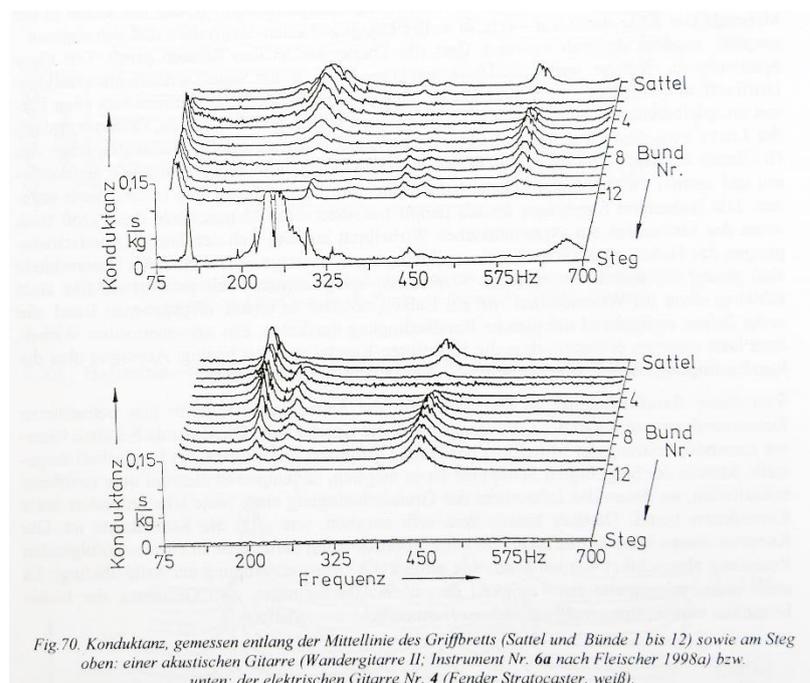


Abbildung 1: Unterschiede der Auflager bei akustischen & elektrischen Gitarren (Fleischer 2001, S. 82)

Eine weitere Studie Fleischers über die „*Schwingungen akustischer Gitarren*“ (1998) zeigt Unterschiede von im Gitarrenständer und in Spielhaltung (in-situ) vermessenen akustischen Gitarren hinsichtlich des dämpfenden Einflusses der Griffhand auf den Gitarrenhals (Fleischer 1998).

In seiner Studie zur „*Modalanalyse und Schallfeldberechnung an Gitarren*“ (1995) fasst Fleischer zusammen, dass es verhindert werden sollte, „*daß Schwingungsenergie von der Saite in den Hals fließt [...]. Dies wäre auf jeden Fall zu vermeiden, wenn der Hals absolut starr wäre [...].*“ (Fleischer 1995, S. 23). Weiter spricht dieser die Problematik der ‚Dead Spots‘ an, welche „*in vollem Umfang für elektrische Zupfinstrumente wie E-Gitarren und E-Bässe*“ (Fleischer 1995, S. 24) gilt.

‚Dead Spots‘

Ein interessantes Phänomen, dass sich vor allem bei elektrischen Gitarren und Bässen beobachten lässt und ausführlich von Fleischer und Zwicker (1996) und Fleischer (1999 & 2000) untersucht worden ist und auch bei Meinel (2014) und Zollner (2010) Erwähnung findet, sind die sogenannten ‚Dead Spots‘. Hierbei handelt es sich um Punkte auf dem Hals bzw. Stellen auf dem Griffbrett des Instruments, welche sich durch schlechtes Sustain und eine sehr rasche Abklingzeit zugehöriger Saitenklänge auszeichnen: „*In aller Regel ist ein Dead Spot dadurch gekennzeichnet, dass die Grundschwingung besonders rasch abklingt*“ (Fleischer und Zwicker 1996, S. 75).

Die Ursache liegt vor allem in der Tatsache, dass der Hals kein starrer Körper ist, sondern schwingt. Eine Saite kann einen Hals zum Mitschwingen bringen, wenn sowohl die Frequenz als auch der Ort der Anregung dafür geeignet sind. Einerseits muss die Voraussetzung erfüllt sein, dass das obere Saitenende in der Nähe eines Schwingungsbauches einer Halsschwingung Kontakt mit dem Hals hat, also über den Obersattel oder einen der Bünde, andererseits muss eine Schwingungsfrequenz der Saite (vornehmlich die Grundfrequenz) mit einer Eigenfrequenz des Halses übereinstimmen (Fleischer und Zwicker 1996). „*Treffen beide Voraussetzungen zu, dann wird die Saite den Hals tatsächlich zum Mitschwingen anregen, was auf Kosten der „Lebensdauer“ ihrer eigenen Schwingung geht*“ (Fleischer und Zwicker 1996; S. 76).

Zwar konnten bis jetzt Erkenntnisse über die Wichtigkeit der Halsschwingungen bei elektrischen Gitarren gesammelt werden, in welchem Maße diese aber wesentlich für den Klang sind, kann bis jetzt aber noch nicht beantwortet werden. Lediglich das Sustain könnte

hier als ein Kriterium, nämlich das der Klangdauer, Einfluss auf den Klang bzw. die Klangfarbe nehmen (siehe Kapitel 4.2.2.1).

Möchte man nun die klanglichen Besonderheiten der verschiedenen bei E-Gitarren zum Einsatz kommenden Hölzer und Bestandteile beschreiben, so kommt man nur schwer an den teils widersprüchlichen Aussagen in Literatur und Fachjournalismus vorbei. Hier widersprechen sich die Aussagen teilweise schon innerhalb eines Buches:

„Holz hat keinen Einfluss auf den Klang (May S. 144). Holz hat Einfluss auf den Klang (May S. 145).“ (Zollner 2010, S. 604).

Auch die folgende Auflistung von Klangattributen, mit denen Erle und Esche im Zusammenhang mit der E-Gitarre in der Literatur und im Fachjournalismus beschrieben werden, zeigen erhebliche Widersprüche und Uneinigkeit:

„Erle: Lieblich, weich, warm, zart, viele Obertöne, zurückhaltender Höhenanteil, fette Bässe, eher dezenter Bassanteil, kräftige Mitten, runder Mittenanteil, viel Sustain, akzentuiert, schwammig, präsent, undifferenziert, ausgeglichen, voller Ton, dünner im Sound als Linde, schnellere Ansprache als Esche.“ (Zollner 2010, S. 606).

„Esche: Weich, rockig, sanft, bassig, brillant, mittig, nicht ausgeprägte Mittenanteile, ausgewogen, lebhaft, druckvoll, stramm, warme Bässe, langes Sustain, trocken, luftig, hartholzartig, attackreich, große Durchsetzungsfähigkeit (denn Esche ist von steifer Struktur), spricht deutlich schneller an als Erle. Heller + obertonreicher + sustainreicher als Erle.“ (Zollner 2010, S. 606).

Neben der Tatsache, dass beide Hölzer eine deutlich schnellere ‚Ansprache‘ als das jeweils andere Holz haben – der Erle wird eine *„schnellere Ansprache“* als Esche zugesprochen und die Esche *„spricht deutlich schneller an als Erle“* (s.o.) – finden sich weitere Ungereimtheiten: der Erle werden sowohl *„viele Obertöne“* aber auf der anderen Seite auch *„zurückhaltende Höhenanteile“* zugesprochen, sie hat sowohl *„fette Bässe“* als auch einen eher *„dezenten Bassanteil“* und ist nebenbei *„akzentuiert“* und *„schwammig“*. Solche und weitere Beispiele des Versuchs dem Holz seine klanglichen Besonderheiten zu entlocken, finden sich in mannigfaltiger Ausführung in Zollners ausgesprochen umfangreicher Forschung über die *„Physik der Elektrogitarre“* (2010). Neben der Sichtung einer Vielzahl von Magazinen und Büchern und die daraus resultierende Auflistung klanglicher Besonderheiten verschiedener Hölzer und Bestandteile, geht Zollner auch auf den Einfluss des Halses und Korpus ein. So ging Zollner anfangs in seinen Untersuchungen zu Hals- und Korpuschwingungen davon aus, *„dass der resistive [auf Druck reagierende] Anteil der Saitenlager (die sog. Konduktanz) den*

Hauptbeitrag zur Saitenbedämpfung liefert, und dass somit das Korpusholz [...] wesentlich für den Klang der E-Gitarre sei.“ (Zollner 2010, S. 4).

Allerdings zeigten seine umfangreichen Untersuchungen zum Abklingverhalten der Saite, dass die Absorption durch den Steg gegenüber der saiteninternen Absorption kaum Bedeutung hat. Dennoch auftretende Stegabsorptionen führt Zollner auf die Stegkonstruktion selbst zurück und nicht auf das verwendete Korpusholz. Eine wesentlich größere Bedeutung schreibt er dagegen den Halsresonanzen zu, *„besonders klangrelevant ist die Oberkante der Bünde, denn davon hängt ab, ob und wo die Saite auf die Bünde prallt (Attack, Snap).“ (Zollner 2010, S. 4).*

In Untersuchungen zu Auflagerdämpfungen der Saiten fielen Zollner Schwebungen der H-Saite an der von ihm untersuchten *Stratocaster* auf, die er jedoch ganz einfach beheben konnte, indem er die H-Saite aus der Nut des Kopf- bzw. Obersattels hob und einen Millimeter danebenlegte: Die wiederholte Messung zeigte, dass die Schwebungen verschwunden waren, allerdings wieder auftauchten, sobald die Saite zurück in ihre Nut gelegt wurde. Daraus schlussfolgerte Zollner: *„natürlich ist der Kopfsattel nicht die alleinige Ursache für ein bestimmtes Klangcharakteristikum, aber er ist wesentlich an der Klangformung beteiligt.“ (Zollner 2010, S. 564), das ist allerdings nur von Bedeutung, solange die leere Saite gespielt wird. Sobald ein Finger auf die Saite auf das Griffbrett drückt, übernimmt der danebenliegende Bund die Auflagerfunktion.“ (Zollner 2010, S. 566).*

Ergänzend zu Zollners Studie wird in der Arbeit *„Einfluss des Korpusholzes auf den Klang eines elektrisch verstärkten Zupfinstruments“ (Herzberg 2021)* der klangliche Einfluss des Korpusholzes untersucht. Auf Grundlage dieser eigenen Studie komme ich zu dem Schluss, dass allein schon die Anzupfposition der Saite einen erheblich größeren Einfluss auf den Klang hat als die Auswahl des Holzes.

Während eine Vielzahl dieser Studien an handelsüblichen Gitarren durchgeführt wurden, sollen in dieser Arbeit Untersuchungen verschiedener Halshölzer bei gleichbleibenden Bedingungen (z.B. Korpus, Elektronik & weitere Bestandteile) im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen, um die Annahmen der bestehenden Forschungen nachvollziehen und überprüfen zu können. Der klangliche Einfluss der Bünde, wie ihn Zollner beschreibt, wird in dieser Arbeit allein durch die Tatsache ausgeschlossen, dass die Testhölzer keinerlei Bünde aufweisen.

3.1 Klang – Der Versuch einer Definition

Folgend soll der Versuch einer Definition des Begriffs ‚Klang‘ unternommen werden. Nach Voigt (2007) *„[...] ist ein Klang eine zeitliche Überlagerung von Tönen, er setzt sich aus einem sogenannten Grundton (Grundfrequenz, Grundschiwingung) und Obertönen zusammen. Jeder Klang hat seine eigenen charakteristischen Obertöne.“* (Voigt 2007, S. 16). Saus (2020) sagt zum Klang: *„Ein Ton mit Obertönen wird in der Physik als Klang bezeichnet [...] Unterschiedliche Klangfarben entstehen durch unterschiedliche Lautstärken der Obertöne.“* (Saus 2020).

Schon im Jahre 1848 formulierte Ohm das nach ihm benannte sog. ‚Ohmsche Gesetz‘, *„wonach die von einem Klang empfundene Klangfarbe nur durch die Amplituden der Teiltöne bedingt wird.“* (Ziegenhals 2017, S. 141). Auch Untersuchungen von Helmholtz in der zweiten Hälfte des 19. Jh. bekräftigten die Erkenntnisse Ohms. Dieser fand jedoch zusätzlich heraus, dass auch nichtharmonische Teiltonreihen auftreten können. Darüber hinaus schreibt Helmholtz in *„Die Lehre von den Tonempfindungen“* (Erstausgabe 1862), dass sich Klänge durch ihre Lautstärke, Tonhöhe und Klangfarbe unterscheiden können. Ergänzend formulierte Bismarck (1972), dass auch Schwankungen im Signal *„eine eigenständige Empfindung darstellen und in Form von Vibrato, Tremolo, Schwebung und Rauigkeit gerade in Bezug auf musikalische Klänge [...] von Bedeutung sind.“* (Ziegenhals 2017, S. 116). Spätestens hier fällt auf, dass der Begriff Klang für sich gar nicht so leicht zu definieren ist, werden doch auch Begriffe wie Lautstärke, Tonhöhe und Klangfarbe gebraucht, um den Klang beschreiben zu können. Während die Lautstärke und Tonhöhe in einfachen Empfindungsskalen leise-laut und tief-hoch und in Form von Maß und Zahl (z.B. Lautstärkepegel in Phon) beschrieben werden können, sieht es bei der Klangempfindung ganz anders aus.

In Ziegenhals *„Musikalische Akustik 1“* (2017) lassen sich folgende Definitionen zur Klangfarbe finden: Miller (1926) definiert Klangfarbe als eine *„Eigenschaft, die es dem Hörer ermöglicht, Instrumente zu identifizieren.“* (Ziegenhals 2017, S. 139), während Pratt und Doak (1976) diese als *„Attribut des Höreindrucks, wodurch ein Hörer beurteilen kann, dass zwei Klänge verschieden sind, unter Verwendung anderen Kriterien als Tonhöhe, Lautstärke und Klangdauer.“* (Ziegenhals 2017, S. 139) definieren. Ziegenhals fasst diese als keine elementare, sondern eine zusammengesetzte Empfindung des Schalls zusammen. Voigt schreibt in ihrer Arbeit zur Klangfarbe: *„Klangfarbe [...] bezeichnet den charakteristischen Klang eines Instruments. [...] Klangfarben variieren in erster Linie aufgrund der Zusammensetzung ihrer Obertöne und deren Intensität.“* (Voigt 2007, S. 17).

Einen weiteren Einfluss auf den Klang eines Musikinstruments hat dessen Konstruktion und die damit einhergehenden Formanten, die nach der Mittelung von Spektren über mehrere Töne entdeckt werden können und ihren Ursprung in der Erforschung der menschlichen

Stimme haben. Formanten entstehen, wenn das Instrument bestimmte Frequenzbereiche unabhängig vom gespielten Ton bevorzugt. Im Spektrum kann man in diesem Fall Frequenzbereiche mit deutlich höheren Pegeln als im restlichen Spektrum erkennen. Diese Formantbereiche treten bei allen Instrumenten auf und sind für den charakteristischen Klang verantwortlich (vgl. Voigt 2007, S. 25-26 und Ziegenhals 2017, S.151-154).

Einen wesentlichen Einfluss auf den Klang hat zudem der Spieler, z.B. der einer Gitarre, der diesen durch die Anzupfposition und Art und Weise des Anzupfens (Dynamik) beeinflussen kann (vgl. Voigt 2007, S.27).

Neben dem Versuch einer eindeutigen Definition des Klangs, besteht zudem das Problem der Klangbeurteilung: *„Die Messung und Beschreibung der Klangfarbe ist z. Z. noch in der Entwicklung begriffen.“* (Ziegenhals 2017, S. 141). Eine gängige Methode zur Klangbeurteilung ist die Beschreibung des Klangs durch subjektive Attribute bzw. Begriffe, wobei diese auf Gegensätzen basieren. Folgende Begriffe als Extrempaare finden häufig Verwendung: dumpf – scharf, voll – leer, kalt – warm, hell – dunkel. Eine Auflistung solcher Paare ließe sich hier noch in die Länge ziehen. Hierbei werden die Klangempfindungen in Hörtests abgefragt, wobei der Anleitung der Hörer durch den Versuchsleiter eine entscheidende Rolle zukommt (vgl. Ziegenhals 2017, S. 139).

Sicherlich könnte man an dieser Stelle versuchen, die Definition des Klanges noch weiter auszuführen, stattdessen sei es mir erlaubt, kurz zusammen zu fassen: Der Klang setzt sich aus einem Grundton und seinen eigenen charakteristischen Obertönen zusammen. Für die Klangfarbe sind sowohl die Tonhöhe, Lautstärke und Klangdauer bedeutend als auch Schwankungen im Signal wie Vibrato, Tremolo, Schwebung und Rauigkeit. Hinzu kommen die Konstruktion der Instrumente und der nicht unwesentliche Einfluss des Spielers auf den Klang.

3.2 Was ist Sustain?

Bei der Gitarre versteht man unter Sustain das Abklingverhalten oder den Pegelabfall der Saite: die angespielten Töne klingen über eine gewisse Zeit nach. *„Anzustreben ist ein sehr gleichmäßiger und hinreichend langer linearer Pegelabfall [...]“* (Meinel 2014, S. 42). Bei akustischen Gitarren tendieren eher massige und steife Konstruktionen (z.B. schwere Decken und Stege) zu einer langen Abklingzeit. Demzufolge ist es naheliegend, dass die massive Konstruktion einer E-Gitarre prädestiniert ist für ein gutes Sustain. Zollner schreibt dazu: *„Wegen der fehlenden Abstrahlverluste ist die Saitendämpfung geringer, das Ausklingen dauert länger, die Gitarre hat ein längeres Sustain.“* (Zollner 2010, S. 89). Anders als bei der akustischen Gitarre, welche die Saitenenergie in Schallenergie umwandelt, mit dem Ziel der

Schallerzeugung, muss die E-Gitarre keine Schallenergie abstrahlen, da dies der Lautsprecher besorgt, was ein längeres Sustain ihrerseits erklärt (vgl. Zollner 2010, S. 88 – 89).

4 Material und Methoden

Im folgenden Abschnitt werden die vorbereitenden Arbeiten und Messmethoden vorgestellt und beschrieben. Zu Beginn soll die Planung und der Bau der Testhalse und des restlichen Instruments eingehend vorgestellt werden. Daraufhin wird ein kurzer Überblick über die genutzten Messverfahren zur Bestimmung der Materialeigenschaften gegeben. Abschließend werden die Versuchsanlage (mechanische Anzupfvorrichtung), die Aufnahme und Weiterverarbeitung der Audiosignale und Erzeugung der Frequenzspektren vorgestellt und beschrieben.

4.1 Planung und Bau des Testinstruments

4.1.1 Planung

Zu Beginn, und nach Festlegung des zu bearbeitenden Themas dieser Bachelorarbeit, musste ein geeignetes Testinstrument geplant werden. Dieses sollte schnell und einfach umzusetzen sein, keine allzu hohen Kosten verursachen und im besten Fall nach Beendigung dieser Arbeit zu einem vollwertigen Instrument ausgebaut werden. Unter Berücksichtigung dieser Vorüberlegungen fiel die Wahl schnell auf die ‚Fender Telecaster‘, aufgrund folgender Vorteile: (1) die Form und der Bau sind einfach und schnell umzusetzen, (2) Hölzer und Bestandteile in ihrer Anzahl übersichtlich und (3) das Instrument in seiner äußeren Gestaltung und Ästhetik noch heute sehr geschätzt. Darüber hinaus sollte (4) die besondere Bauweise einer geschraubten Hals-Korpus-Verbindung ein schnelles Wechseln der Testhalse zwischen den einzelnen Messungen gewährleisten und lediglich einen Testkorpus mit den dazugehörigen Bestandteilen notwendig machen. Durch den Gebrauch von lediglich einem Testkorpus und einem Set Bestandteile sollte zusätzlich eine bessere Vergleichbarkeit der Testhalse erzielt werden, da so eventuelle Fehlerquellen durch Materialschwankungen dezimiert werden sollten. Aufgrund der Überlegung die Kosten übersichtlich zu halten, wurde sich im Nachhinein für den Bau einer elektrisch verstärkten Tenor Ukulele in oben genannter Bauweise entschieden. Nachdem die Entscheidung getroffen worden war, konnte mit der Umsetzung der Zeichnung begonnen werden. Zu diesem Zweck wurde mit dem Programm *Inkscape* unter Berücksichtigung originaler Zeichnungen einer ‚Fender Telecaster‘ die Korpus- und Halsform gezeichnet und auf die Größe einer Tenor Ukulele skaliert. Die Ausfräsungen für die Elektrik,

die Bohrungen und die weiteren Bestandteile, wie ‚Bridge‘, E-Fachabdeckung, Halsplatte und ‚Pickguard‘, wurden daraufhin zusätzlich ergänzt und angepasst. Auf Basis der entstanden Zeichnung konnte daraufhin mit der Fertigung der Frässchablonen begonnen werden, welche beim späteren Bau eine einheitliche und schnellere Anfertigung des Instruments und der Testhalse gewährleisten sollten. Die Schablonen wurden mit der am *Studiengang Musikinstrumentenbau* befindlichen CNC-Maschine umgesetzt.

4.1.2 Bau der Testhalse

Nach der Fertigstellung der Frässchablonen konnte mit dem Bau der Testhalse begonnen werden. Die drei Halsrohlinge (Ahorn, Erle und Khaya Mahagoni) wurden zunächst abgerichtet, ausgehobelt und zuletzt auf eine identische Materialstärke ausgeschliffen. Daraufhin wurden die Nuten und Bohrungen für die Halsspannstäbe gefräst und gebohrt, diese eingesetzt und die bereits geschlitzten Griffbretter auf die Halsrohlinge geleimt. Beim Ahorn fiel die Wahl auf ein identisches Griffbrett aus demselben Ahorn und bei den anderen beiden Hölzern auf Griffbretter aus kerngeräuchertem Eukalyptus, welche demselben Stamm entstammten. Nach einer angemessenen Trocknungszeit des Leims wurden die Köpfe auf eine einheitliche Materialstärke gebracht und die Hals- und Kopfform grob ausgesägt, um danach unter Verwendung der Frässchablone ausgefräst zu werden. Schlussendlich wurden die Bohrungen für die Mechaniken gesetzt und die Obersättel angepasst. Die Testhalse wurden weder ausgeformt und bundiert, noch einer Oberflächenbehandlung unterzogen, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten.



Abbildung 2: Ahorn Testhals, Vorderansicht

Abbildung 3: Ahorn Testhals, Rückansicht



Abbildung 4: Erle Testhals, Vorderansicht

Abbildung 5: Erle Testhals, Rückansicht



Abbildung 6: Khaya Mahagoni Testhals, Vorderansicht

Abbildung 7: Khaya Mahagoni Testhals, Rückansicht

Die Abbildungen 2 – 7 zeigen die fertigen Testhalse, welche Gegenstand der folgenden Messungen und Untersuchungen sind.

4.1.3 Bau des Korpus und seiner Bestandteile

Für den Bau des Testkorpus wurde sich für Nussbaum entschieden. Dieser wurde zunächst aus zwei Teilen gefügt, abgerichtet, ausgehobelt und schlussendlich auf eine endgültige Materialstärke ausgeschliffen. Die Form wurde grob ausgesägt und mit Hilfe der Frässchablone ausgefräst. Daraufhin wurden die Ausfräsungen für den Hals und die Elektrik ausgefräst und die nötigen Bohrungen gesetzt. Aufgrund der besonderen Ausmaße der elektrisch verstärkten Tenor Ukulele, konnten die Bestandteile, hier ‚Bridge‘, E-Fachabdeckung und Halsplatte, nicht einfach eingekauft werden, sondern mussten in Eigenregie angefertigt werden. Diese wurden aus 1,6 mm starken Messingblech gefertigt, wobei die ‚Bridge‘ aus zwei Teilen zusammengelötet und mit eingekauften Saitenreitern ergänzt werden musste. Der fertige Korpus und die Bestandteile können den Abbildungen 8 und 9 entnommen werden.



Abbildung 8: Nussbaum Testkorpus, Vorderansicht



Abbildung 9: ‚Bridge‘, E-Fachabdeckung & Halsplatte

4.2 Messverfahren

Im Folgenden werden die Messverfahren selbst und deren Durchführung vorgestellt und beschrieben. Dabei wird sowohl auf die Messverfahren zur Bestimmung der Materialeigenschaften mittels des *Lucchimeters* und der Zweipunktübertragungskurve (Frequenzgang) eingegangen als auch die Vorgehensweise der Aufnahmen der Audiosignale und deren Weiterverarbeitung vorgestellt. Die Darstellung der Messergebnisse sowie deren Auswertung als auch Diskussion werden in Kapitel 5 behandelt.

4.2.1 Bestimmung der Materialeigenschaften

4.2.1.1 *Lucchimeter*

Das *Lucchimeter* bietet eine Methode zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit und des Elastizitätsmoduls, unter zusätzlicher Angabe der Länge und Dichte der Probestücke. Dieses wurde ursprünglich speziell für Messungen an Bogenstangen-Rohlingen entwickelt, um diese nach ihrer Güte sortieren zu können. Die Methode beruht auf der Laufzeitmessung von Schallimpulsen im Material mittels Ultraschallimpulsen (vgl. Ziegenhals 2017, S.67).

Zu Beginn wurden die drei Halsrohlinge sowohl längs als auch quer zur Faserrichtung mit dem am *Studiengang Musikinstrumentenbau* zur Verfügung stehenden *Lucchimeter* auf ihre Materialeigenschaften vermessen. Die erfassten Daten, die Abmessungen und die Masse der Hölzer wurden daraufhin mit dem am Studiengang erstellten Excel Programms „*Vorlage Erfassung Material und Geometriedaten Gitarre und Violine*“ ausgewertet, welches folgende Materialeigenschaften automatisch berechnet und angibt: Schallgeschwindigkeit, Gewicht, Dichte, E-Modul und akustische Konstante. In Kapitel 5.1.1 können die Messergebnisse und deren Auswertung und Diskussion nachvollzogen werden.

4.2.1.2 *Zweipunktübertragungskurve*

Mittels der Zweipunktübertragungskurve, auch als Frequenzgang bezeichnet (vgl. Ziegenhals 2017, S.145), sollen die verwendeten Testhälse auf ihre Schwingungseigenschaften untersucht werden. Das Prinzip dieser Methode ist bei Ziegenhals (2017, S. 145) beschrieben:

„Bei der als hier als Zweipunktübertragungskurve bezeichneten Messungen werden typisch zwei beliebige Punkte auf dem Instrument gewählt. Einer der Punkte dient der Erregung, am anderen wird die Systemantwort aufgenommen. Aufgenommen wird der Frequenzgang Schwingung pro eingebrachte Kraft“ (Ziegenhals 2017, S.145).

Zu diesem Zweck wurden zum einen die Hälse für sich und zum anderen im eingebauten spielfertigen Zustand mit Korpus und Bestandteilen vermessen.

Die Messungen wurden mit dem am *Studiengang Musikinstrumentenbau* befindlichen *Ono Sokki FFT Analyzer CF-7200* durchgeführt. Der jeweils zu vermessene Hals wurde während der Messreihe mit dem Griffbrett nach unten an seinen zwei Endpunkten auf Schaumstoff gelagert. Der Beschleunigungsaufnehmer wurde auf der Rückseite im Bereich des Obersattels auf der Diskantseite befestigt und der Anregungspunkt mittels des Impulshammers auf der

Rückseite mittig des zwölften Bunds festgelegt. Der Aufbau und die Positionierung können der Abbildung 10 entnommen werden.

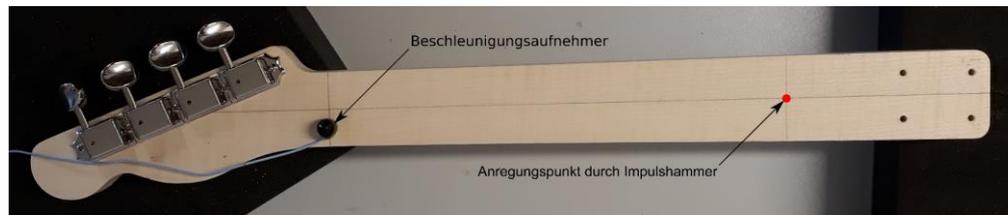


Abbildung 10: Positionierung des Beschleunigungsaufnehmers & Impulshammers am Hals

Die Lagerung des spiefertigen Instruments wurde ähnlich umgesetzt: der Kopf wurde an einem Ende und der Korpus im Bereich des ‚Endpins‘ am anderen Ende auf Schaumstoff gelagert. Die Positionierung des Beschleunigungsaufnehmers und des Anregungspunkts durch den Impulshammer wurden wie schon in der Studie „*Einfluss des Korpusholzes auf den Klang eines elektrisch verstärkten Zupfinstruments*“ (Herzberg 2021) festgelegt, um gegebenenfalls die Ergebnisse mit einander vergleichen zu können. Zusätzlich wurden die Leersaiten während der Messungen mit einem Papiertuch bedämpft, um ein Mitschwingen zu vermeiden. Abbildung 11 zeigt die Positionierung des Beschleunigungsaufnehmers und Anregungspunkts durch den Impulshammer.



Abbildung 11: Positionierung des Beschleunigungsaufnehmers & Impulshammers am Korpus

Insgesamt wurde das zu vermessene Objekt während jeder Messreihe zehnmal mit dem Impulshammer am Anregungspunkt angeregt. Diese zehn Schläge wurden automatisch vom *Ono Sokki FFT Analyzer CF-7200* gemittelt und daraus der Frequenzgang mit zugehörigen Kohärenzverlauf erstellt. Die Messungen wurden lediglich bis 2 kHz durchgeführt, da ab einer höheren Frequenz ein enormer Abfall des Kohärenzverlaufs zu beobachten war und man hier

keine aussagekräftigen Auswertungen hätte treffen können. Den Abbildungen 12 und 13 können jeweils ein Frequenzgang und Kohärenzverlauf bis 2 kHz und bis 5 kHz, wie diese vom *Ono Sokki FFT Analyzer CF-7200* angezeigt werden, entnommen werden.

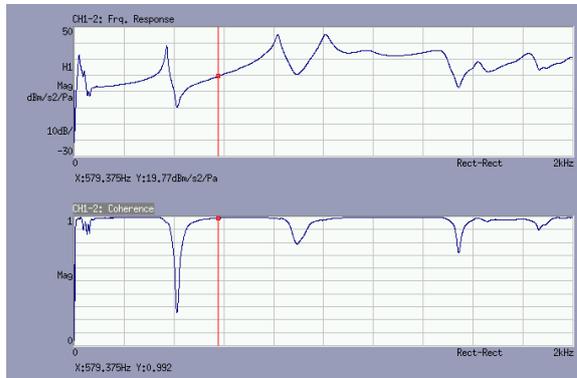


Abbildung 12: Ono Sokki - Ahorn-Hals 2 kHz

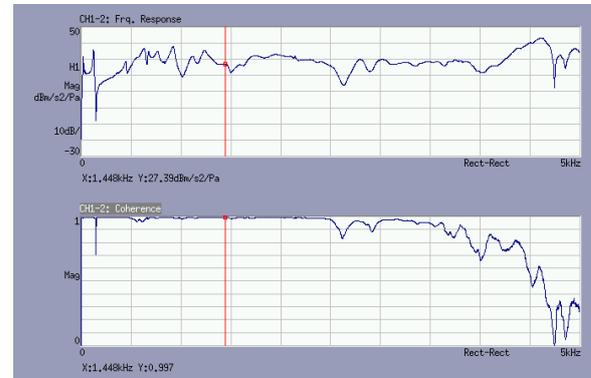


Abbildung 13: Ono Sokki - Ahorn-Hals spielfertig 5 kHz

Aus den erhaltenen Daten der Frequenzgänge im *.txt*-Format wurden abschließend mittels eines in *Matlab* erstellten Programms graphische Darstellungen zur späteren Auswertung erstellt (s. Kapitel 5.1.2.). Abbildung 14 zeigt die Einstellungen des Programms.

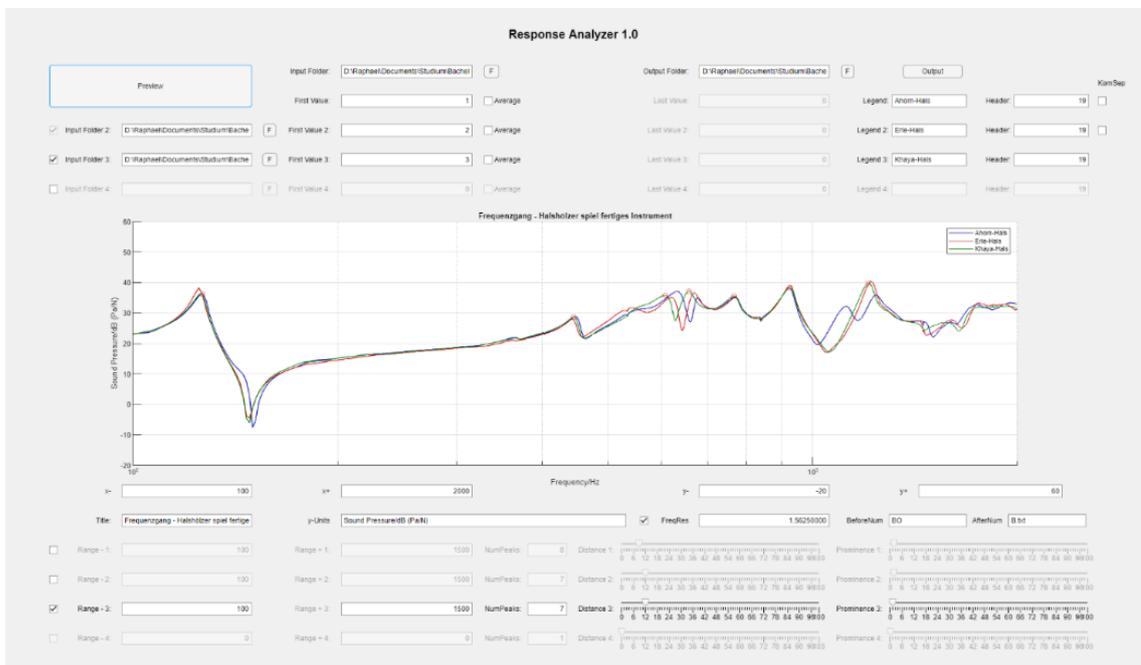


Abbildung 14: ‚Screenshot‘ - Frequenzgang visualisiert mit Matlab

4.2.2 Messverfahren zur Bestimmung des Einflusses auf den Klang

4.2.2.1 Aufnahme und Verarbeitung der Audiosignale und Frequenzspektren

Als Ausgangspunkt für die spätere Bestimmung des Einflusses der Halshölzer auf den Klang wurden Audiosignale der einzeln angezupften Leersaiten am spielfertigen Instrument, welches jeweils mit einem der drei Testhälse ausgestattet wurde, aufgenommen. „*Ein Audiosignal (auch Tonsignal) ist ein elektrisches Signal, das akustische Informationen transportiert.*“ (Ziegenhals 2017, S. 91). Das zu vermessene spielfertige Instrument wurde am Unterbug mit einer Schraube über das Bohrloch des ‚Gurtpins‘ an einem Winkel fixiert und im Bereich der Halsplatte auf den vorderen beiden Halsschrauben auf Schaumstoff gelagert, wodurch der Hals frei schwingen konnte (s. Abbildungen 18 & 19, Kapitel 4.2.2.2.1). Diese einfache Vorrichtung sollte beim Wechsel der Hälse und dem dabei notwendigen Ein- und Ausspannvorgang des Instruments gewährleisten, dass dieses bei der Aufnahme der Audiosignale auf dieselbe Art und Weise gelagert wird. Mittels einer Anzupfvorrichtung (s. Kapitel 4.2.2.2.1) wurde jede der vier Leersaiten (g – c‘ – e‘ – a‘) einzeln in drei Messreihen je zwanzigmal angezupft. Das spielfertige Instrument wurde zu diesem Zweck jeweils mit einem der drei Testhälse ausgestattet. In jeder Messreihe erfolgte das Anzupfen der Saiten an einer Position nahe dem Halse und nahe der ‚Bridge‘ bei aufgedrehtem ‚Volume‘- und ‚Tone‘-Potentiometer und der Abnahme beider Tonabnehmer. Zusätzlich wurden noch Aufnahmen an der Anzupfposition nahe der ‚Bridge‘ mit zugebremstem ‚Tone‘-Potentiometer gemacht. Beim Anzupfvorgang wurde stets darauf geachtet, dass die Saite immer an derselben Stelle des eingespannten Plektrums erregt wurde. Das elektrische Signal der jeweils erregten Saite wurde ausgehend vom verwendeten Gitarrenverstärker, einem *Boss Katana-Air*, über eine USB-Verbindung mit dem PC verbunden und mit dem Programm *Audacity* aufgenommen. Zur Erleichterung und Gewährleistung gleicher Aufnahmebedingungen, wurde bei *Audacity* die pegelgesteuerte Aufnahme aktiviert. Der Aussteuerungsbereich des dB-Bereichs wurde auf -96 dB (PCM-Bereich von 16-Bit-Samples „CD-Qualität“) erhöht und die pegelgesteuerte Aufnahme bei -84 dB aktiviert, sodass bei einer Überschreitung von -84 dB automatisch die Aufnahme gestartet und bei einer Unterschreitung beendet wird. Anders ausgedrückt: Sobald die Saite erregt wird, also in Schwingung versetzt wird, startet die Aufnahme, und endet, sobald der Ausschwingvorgang beendet ist. Abbildung 15 zeigt die Aufnahme einer Messreihe über zwanzig Anzupfvorgänge der a‘-Saite an der Anzupfposition nahe dem Halse am Beispiel des Ahorn-Halses. Die zwanzig aufgenommenen Anzupfvorgänge wurden anschließend einer Frequenzanalyse unterzogen und die entsprechende *.txt*-Datei exportiert. Abbildung 16 zeigt den Vorgang dieser Analyse mittels *Audacity*.

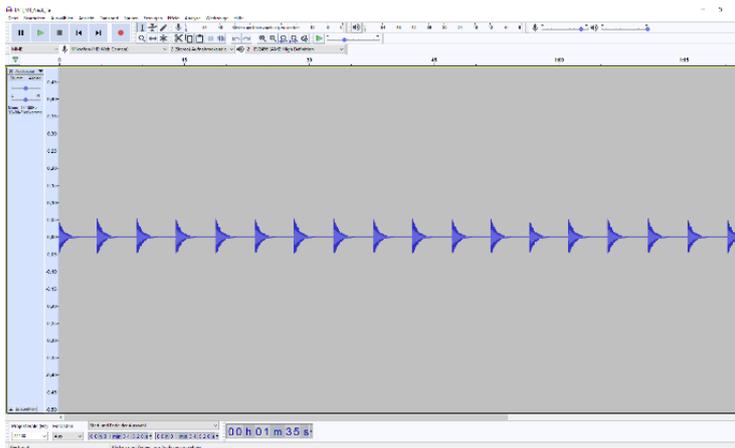


Abbildung 15: Aufnahme der Audiosignale über zwanzig Anzupfvorgänge

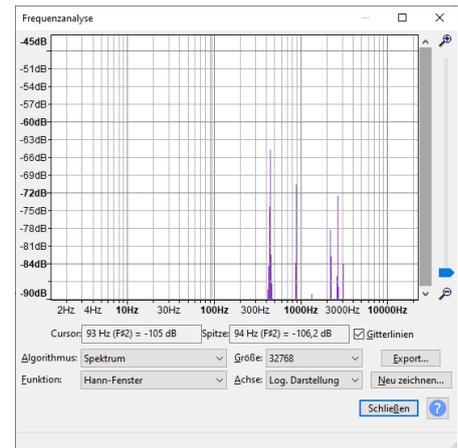


Abbildung 16: Frequenzanalyse mit Audacity

Die so erhaltenen .txt-Dateien wurden mit einem in *Matlab* erstellten Programm weiterverarbeitet und die Frequenzspektren zur späteren Auswertung erstellt. Abbildung 17 zeigt die Verarbeitung mit den jeweiligen Einstellungen des Programms und ein erzeugtes Frequenzspektrum. Ziegenhals definiert: „*Ein Spektrum ist die Darstellung der Zusammensetzung eines Signals [...], wobei den einzelnen Frequenzen bzw. Frequenzbereichen ihr Energieanteil am Gesamtsignal zugeordnet wird.*“ (Ziegenhals 2017, S. 57). Die in dieser Arbeit erzeugten Frequenzspektren geben Auskunft über die Zusammensetzung der Frequenzen (x-Achse bis 10 kHz) des jeweiligen Tons (g, c', e' oder a') und dessen Pegel bzw. Amplitude (y-Achse in dB). In Abbildung 17 wird das Signal der erregten a'-Saite dargestellt: Die Frequenz des Grundtons liegt hier bei 440 Hz (erster Peak). Auf diesen folgen seine Obertöne mit entsprechenden Amplituden.

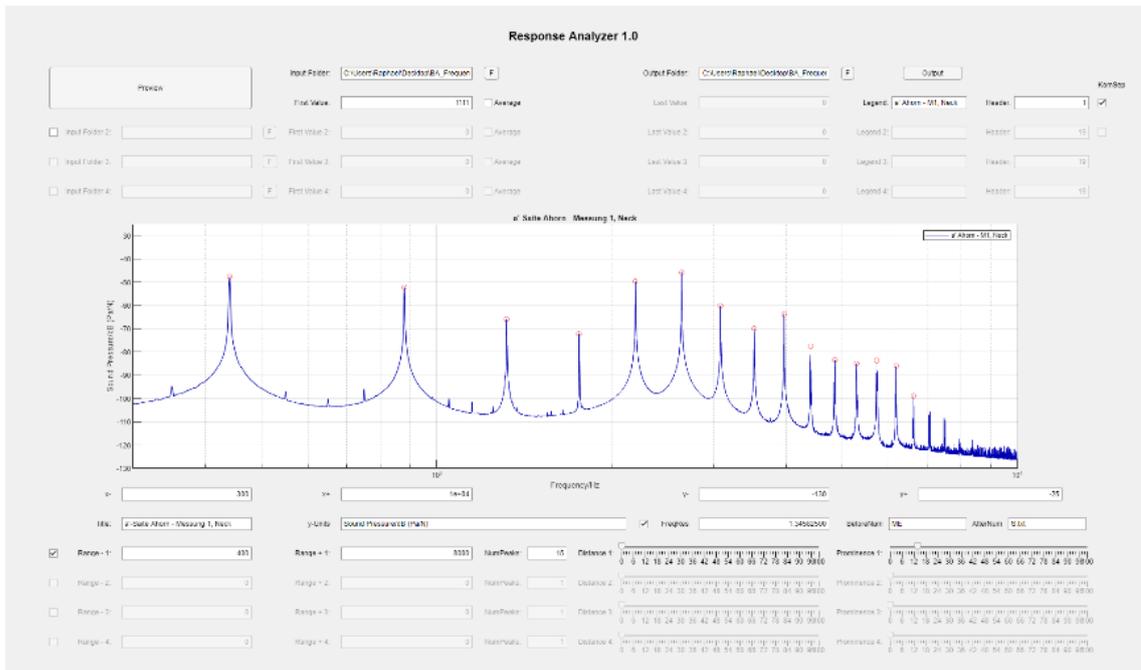


Abbildung 17: ‚Screenshot‘ - Frequenzspektrum visualisiert mit Matlab

Zusätzlich wurden sowohl die Frequenz- als auch die Amplitudenwerte der ersten 15 Peaks in einer *Excel* Tabelle gesammelt und zusammengefasst, um so jeweils die Maxima, Minima, Mittelwerte und maximalen Abweichungen über die jeweils drei durchgeführten Messreihen herausstellen zu können. Tabelle 1 veranschaulicht die Vorgehensweise der Zusammenfassung der gesammelten Werte der Messreihen 1 – 3 am Beispiel der a‘-Saite mit Ahorn Testhals.

Eine komplette Übersicht kann dem beiliegenden Datenträger entnommen werden und ist unter dem Dateinamen *Bachelorthesis_Frequenz_&_Pegelwerte_Frequenzspektrum.xlsx* zu finden.

Ausgehend von den Mittelwerten der Amplituden und Frequenzen wurden Liniendiagramme erstellt, die aufgrund ihrer Übersichtlichkeit eine bessere Vergleichbarkeit der Messungen gewährleisten sollten. Diese werden in Kapitel 5.2.2 dargestellt und diskutiert.

Tabelle 1: Zusammenfassung Frequenzen (in Hz) und Pegel (in dB) der Messreihen 1 – 3 am Ahorn-Hals

Ahorn Testhals								
a'-Saite – Anzupfposition Bridge								
	Messreihe 1		Messreihe 2		Messreihe 3			
Peak	Frequenz	Pegel	Frequenz	Pegel	Frequenz	Pegel		
1	440,08	-55,63	440,08	-56,06	440,08	-55,87		
2	880,17	-57,34	880,17	-57,75	880,17	-57,13		
3	1321,60	-64,08	1320,25	-65,11	1320,25	-66,88		
4	1761,68	-60,18	1760,34	-62,35	1760,34	-62,18		
5	2203,12	-46,02	2201,77	-47,46	2201,77	-47,58		
6	2644,55	-47,25	2641,85	-48,74	2641,85	-48,36		
7	3085,98	-63,41	3083,29	-56,51	3081,94	-65,35		
8	3527,41	-60,27	3524,72	-59,73	3524,72	-59,90		
9	3966,15	-73,90	3964,80	-70,53	3966,15	-74,01		
10	4411,61	-83,51	4406,23	-85,81	4400,85	-86,84		
11	4855,74	-82,12	4851,70	-81,02	4853,04	-83,95		
12	5286,40	-83,07	5295,82	-76,62	5285,05	-85,40		
13	5731,87	-84,56	5726,49	-83,74	5722,45	-84,20		
14	6189,45	-84,20	6185,41	-84,03	6184,07	-85,22		
15	6633,57	-87,68	6629,53	-89,56	6629,53	-89,30		
Auswertung der Messreihen 1 – 3								
	Frequenz (in Hz)				Pegel (in dB)			
Peak	Minima	Maxima	Mittelwert	max. Abw.	Minima	Maxima	Mittelwert	max. Abw.
1	440,08	440,08	440,08	0,00	-56,06	-55,63	-55,86	0,43
2	880,17	880,17	880,17	0,00	-57,75	-57,13	-57,40	0,62
3	1320,25	1321,60	1320,70	1,35	-66,88	-64,08	-65,36	2,80
4	1760,34	1761,68	1760,79	1,35	-62,35	-60,18	-61,57	2,17
5	2201,77	2203,12	2202,22	1,35	-47,58	-46,02	-47,02	1,56
6	2641,85	2644,55	2642,75	2,69	-48,74	-47,25	-48,12	1,49
7	3081,94	3085,98	3083,73	4,04	-65,35	-56,51	-61,76	8,84
8	3524,72	3527,41	3525,61	2,69	-60,27	-59,73	-59,97	0,53
9	3964,80	3966,15	3965,70	1,35	-74,01	-70,53	-72,81	3,48
10	4400,85	4411,61	4406,23	10,77	-86,84	-83,51	-85,39	3,32
11	4851,70	4855,74	4853,49	4,04	-83,95	-81,02	-82,36	2,93
12	5285,05	5295,82	5289,09	10,77	-85,40	-76,62	-81,70	8,78
13	5722,45	5731,87	5726,93	9,42	-84,56	-83,74	-84,17	0,82
14	6184,07	6189,45	6186,31	5,38	-85,22	-84,03	-84,49	1,19
15	6629,53	6633,57	6630,88	4,04	-89,56	-87,68	-88,85	1,88

4.2.2.1.1 Mechanische Anzupfvorrichtung

Eine weitere Herausforderung bestand darin, die Saiten der zu vermessenen Testobjekte gleichbleibend wiederkehrend anzuzupfen, um so einheitliche und reproduzierbare Aufnahmen der Audiosignale für eine optimale Vergleichbarkeit machen zu können. Zu diesem Zweck wurde eine einfache mechanische Anzupfvorrichtung entwickelt und gebaut, welche schon in der Studie „*Einfluss des Korpusholzes auf den Klang eines elektrisch verstärkten Zupfinstruments*“ (Herzberg 2021) Verwendung fand. Diese Vorrichtung wurde aus Klemmbausteinen der Firma *Lego*, dem *Mindstorms Robotics Invention System (RIS) 2.0*, umgesetzt. Über einen verlängerten Arm, an dessen Ende ein Plektrum befestigt und über den Saiten des eingespannten Instruments ausgerichtet wurde, konnten die einzelnen Leersaiten durch motorgesteuertes Verfahren des Arms angezupft werden. Die Abbildungen 18 und 19 zeigen die Anzupfvorrichtung im Betrieb am spielfertigen Instrument.

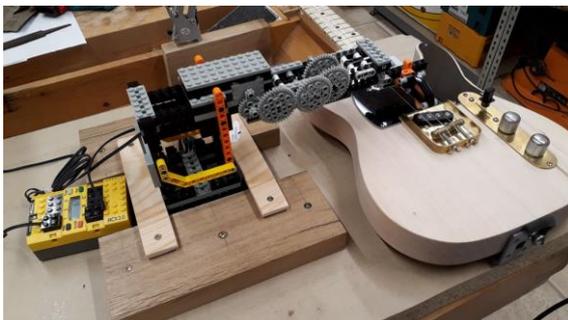


Abbildung 18: Anzupfvorrichtung Ansicht 1



Abbildung 19: Anzupfvorrichtung Ansicht 2

4.2.3 Messverfahren zur Bestimmung des Einflusses auf das Sustain

4.2.3.1 Sustain – Verarbeitung der Audiosignale

Wie bereits in Kapitel 4.2.2.2 beschrieben, wurden die Aufnahmen der Audiosignale mittels einer Anzupfvorrichtung über einen mit dem PC verbundenen Gitarrenverstärker und dem Programm *Audacity* durchgeführt. Die in *Audacity* aufgenommenen Ausschwingvorgänge der einzelnen Leersaiten wurden hinsichtlich ihrer Schwingungsdauer untersucht, um Aufschluss über das Sustain zu erhalten. Zu diesem Zweck wurden die zwanzig aufgenommenen Ausschwingvorgänge der jeweiligen Leersaite innerhalb einer Messreihe in Kombination mit einem der drei Testhälse addiert. Abbildung 20 verdeutlicht die Vorgehensweise: zu sehen sind die zwanzig aneinander gereihten Ausschwingvorgänge einer Saite im Programm *Audacity*, die in Summe eine zeitliche Länge von 101,08 s ergeben.

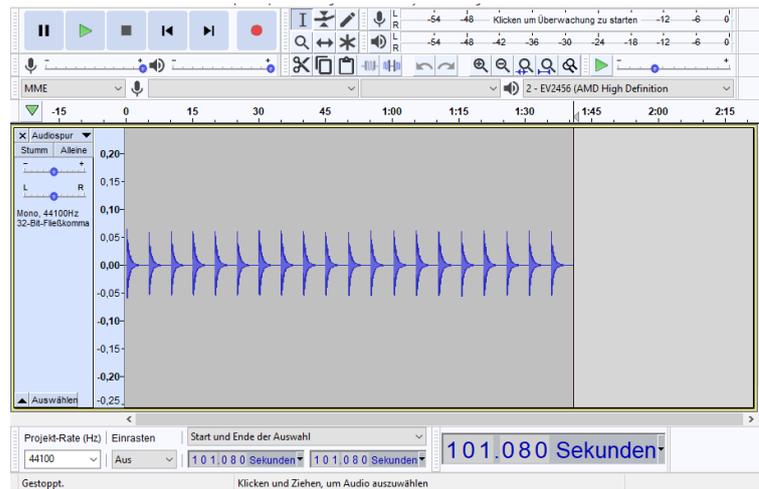


Abbildung 20: Audacity: zeitliche Länge zwanzig aneinander gereihter Ausschwingvorgänge

Am Beispiel der Tabelle 2 kann man weiter nachvollziehen: Die 101,08 s der Messreihe 1 bilden die Summe über die zwanzig aufgezeichneten Ausschwingvorgänge anhand der a'-Saite in Kombination mit dem Khaya Mahagoni Testhals. Mit den Messreihen 2 und 3 wurde genauso verfahren und anschließend alle drei Messreihen miteinander addiert: in Tabelle 2 zu sehen unter „Summe der Messreihen 1 – 3“. Die endgültige Summe von 300,15 s, die die zeitliche Länge von insgesamt sechzig Ausschwingvorgängen der angezupften a'-Saite bildet, wurde abschließend durch sechzig dividiert, um die durchschnittliche Schwingungsdauer, das Sustain, der Saite zu erhalten. Im Falle des Beispiels erhält man für die a'-Saite in Kombination mit dem Khaya Mahagoni Testhals ein durchschnittliches Sustain von 5,0025 s (gerundet 5 s).

Tabelle 2: Beispiel: durchschnittliches Sustain der a'-Saite

Khaya Mahagoni Testhals			
a'-Saite – Anzupfposition Hals			
Zeitl. Länge über zwanzig Ausschwingvorgänge (in s)			
<i>Messreihe 1</i>	<i>Messreihe 2</i>	<i>Messreihe 3</i>	<i>Summe der Messreihen 1 - 3</i>
101,08 s	98,79 s	100,28 s	300,15 s
Durchschn. Schwingungsdauer über sechzig Ausschwingvorgänge: 5,0025 s → 5,00 s			

Auf diese Weise wurden auch für die übrigen Saiten, welche in Kombination mit einem der drei Testhälse vermessen wurden, das durchschnittliche Sustain gebildet. Eine Tabelle der übrigen Werte lässt sich dem Anhang entnehmen.

4.2.3.2 Sustain – ‚Ranking‘-Erstellung

Um in der abschließenden Auswertung dieser Studie eine Aussage treffen zu können, welches Hals- bzw. Korpusholz ein eher langes oder kurzes Sustain begünstigt, wurde ein ‚Ranking‘ dieser Hölzer erstellt. Hals- und Korpushölzer wurden getrennt voneinander ausgewertet. Die Vorgehensweise wird folgend am Beispiel der Tabelle 3 erläutert: Aus dieser lassen sich die durchschnittlichen Abklingzeiten der Leersaiten – g, c‘, e‘ und a‘ – des jeweiligen Halsholzes ablesen. Das jeweils längste Sustain einer Leersaite an einem der drei Hälse wurde mit dem Wert 100 bewertet: Für die g-Saite wäre das hier z. B. der Khaya Mahagoni mit 15,61 s. Die Werte der anderen beiden Hölzer wurden mit dem jeweils höchsten Wert in ein prozentuales Verhältnis gesetzt: Bei der g-Saite wurde die Erle mit 15,01 s demzufolge mit 96,2 Punkten bewertet.

$$\frac{100}{15,61 \text{ s}} * 15,01 \text{ s} = 96,2$$

Diese Vorgehensweise sollte sicherstellen, dass das Ergebnis auch das Ausmaß des Einflusses eines jeden Halsholzes auf die jeweilige Leersaite widerspiegelt. So hat z. B. im Vergleich der Erle mit dem Mahagoni ein zeitlicher Unterschied des Sustains von 1,31 s bei der a‘-Saite größere Auswirkungen auf die Punktevergabe als bei der e‘-Saite. Die Punkte jedes Halsholzes wurden letztendlich miteinander addiert und aus der Summe eine Platzierung der Hölzer festgelegt.

Tabelle 3: Beispiel – ‚Ranking‘-Erstellung

‚Ranking‘ Halshölzer - durchschnittliches Sustain der Saiten (in s)										
	g-Saite		c‘-Saite		e‘-Saite		a‘-Saite		‚Ranking‘	
	<i>d. S.</i>	<i>R.-P.</i>	<i>d. S.</i>	<i>R.-P.</i>	<i>d. S.</i>	<i>R.-P.</i>	<i>d. S.</i>	<i>R.-P.</i>	<i>S. R.-P.</i>	<i>Pltz.</i>
Ahorn	14,78	94,7	11,73	94,8	7,62	88,4	4,96	99,2	377,1	2
Erle	15,01	96,2	12,37	100,0	7,31	84,8	3,69	73,8	354,8	3
Khaya	15,61	100,0	10,77	87,1	8,62	100,0	5,00	100,0	387,1	1
<i>Abkürzungsverzeichnis</i>										
<i>d. S.: durchschnittliches Sustain</i>						<i>S. R.-P.: Summe ‚Ranking‘-Punkte</i>				
<i>R.-P.: ‚Ranking‘-Punkte</i>						<i>Pltz.: Platzierung</i>				

4.3 Fehlersuche und -reduzierung

Im Folgenden wird auf Überlegungen und Umsetzungen zur Fehlerreduzierung eingegangen, welche die Aussagekraft und Qualität der Ergebnisse sichern sollen. Dabei wird kurz auf die Reduzierung der Fehler während des Baus der Testhalse bzw. -instruments und während der Aufnahmen der Audiosignale eingegangen.

4.3.1 Testinstrument

Die Testhalse

Bei der Fertigung der Testhalse musste darauf geachtet werden, dass alle drei Halse identisch gebaut wurden. Aus diesem Grund wurden zu Anfang die Halsrohlinge an den Maschinen mit denselben Einstellungen bearbeitet. Für eine bessere Reproduzierbarkeit der Umrisse von Hals und Kopf, wurde eine Frässhablone angefertigt, mit welcher die Halse mit einem Kopierfräser identisch ausgefräst werden konnten. Während des gesamten Bauprozesses wurden die Maße der Halse immer wieder miteinander verglichen und diese einheitlich ausgearbeitet. Die Halse wurden weder bundiert, noch profiliert oder ausgeformt, um auch hier mögliche Fehlerquellen durch abweichende Dimensionen ausschließen zu können.

Der Korpus und seine Bestandteile

Die Reduzierung der Fehler beim Korpus und den Bestandteilen konnte recht einfach umgesetzt werden, da die Konstruktion des Testinstruments – einer geschraubten Hals-Korpus-Verbindung – lediglich einen Korpus mit seinen Bestandteilen voraussetzte. Die Bestandteile, also Elektrik, ‚Bridge‘, ‚Pickguard‘ und E-Fachabdeckung, brauchten nur zu Anfang montiert und ausgerichtet werden.

4.3.2 Audioaufnahmen

Nachdem die Fehler durch den Bau der Testhalse und der restlichen Komponenten weitestgehend eingegrenzt worden waren, mussten mögliche Fehler, mit denen während der Aufnahmeprozesse der Audiosignale zu rechnen wäre, erkannt und reduziert werden. Eine erste große Fehlerreduzierung konnte zum einen durch die einfache Einspann- und zum anderen durch die Anzupfvorrichtung erreicht werden. Nichtsdestotrotz musste davon ausgegangen werden, dass es durch das häufige Ein- und Ausspannen der Testinstrumente zu kleinen Abweichungen kommen könnte. Auch eine unterschiedliche Ausrichtung der Saiten

zur Anzupfvorrichtung mussten berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurden die Aufnahmen der Audiosignale in jeweils drei Messreihen durchgeführt, wobei das Testinstrument zwischen jeder Messreihe ausgespannt und auseinandergelöst wurde: das Testinstrument wurde aus der Einspannvorrichtung entfernt, die Saiten entspannt und der Hals vom Korpus gelöst. Daraufhin wurde das Instrument wieder zusammengebaut und eingespannt. Zusätzlich wurden innerhalb einer Messreihe von jeder Saite zwanzig Audiosignale hintereinander aufgezeichnet. Wie in Abbildung 21 zu sehen ist, treten bereits im Vergleich zweier Frequenzspektren aus zwei Messreihen, durchgeführt an ein und derselben Saite in Kombination desselben Halses, kleine Pegelabweichungen der Obertöne auf. Die Frequenzabweichungen sind hier optisch nicht auszumachen.

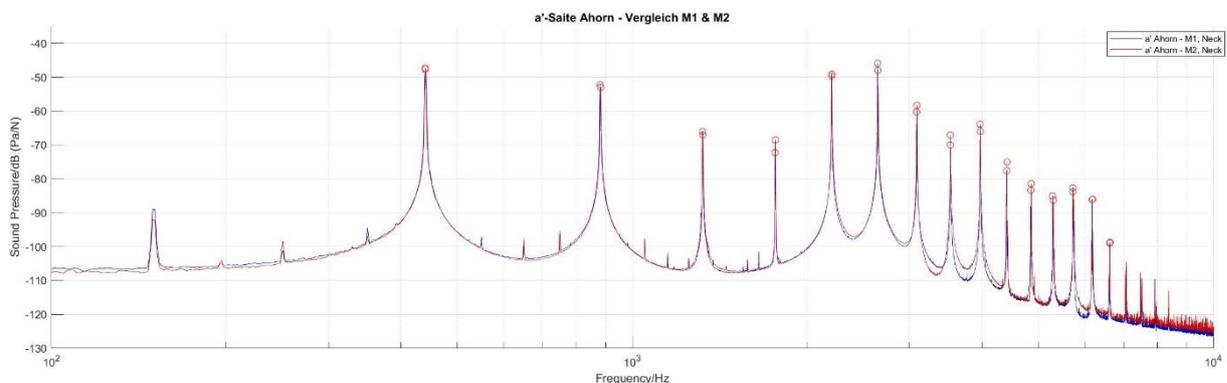


Abbildung 21: Vergleich zweier Frequenzspektren an ein und derselben Saite, aus zwei Messreihen

Aus den jeweils drei zusammengehörigen Messreihen wurden sowohl die Frequenz – als auch Pegelwerte der ersten 15 Peaks, d.h. des Grundtons und der 14 darauffolgenden Obertöne, in einer *Excel*-Tabelle zusammengefasst und aus diesen Werten zu jedem Peak der Mittelwert gebildet, um so die auftretenden Abweichungen der jeweils in drei Messreihen vermessenen Saite in Kombination eines der drei Testhälse zu mitteln (s. Tabelle 1, Kapitel 4.2.2.2) und so in erstellten Liniendiagrammen vergleichbar zu machen. Abbildung 22 veranschaulicht die Vorgehensweise an einem Liniendiagramm. Gegenstand ist hier die a'-Saite, erregt nahe dem Halse, in Kombination des Ahorn Testhalses. Zu sehen sind hier die Pegelverläufe der drei Messreihen in den Farben Blau, Orange und Grau der ersten 15 Peaks. Obwohl hier ein und dieselbe Saite in Kombination mit ein und demselben Testhals vermessen wurde, lassen sich im Vergleich der drei Messreihen unterschiedliche Pegelwerte ausmachen. Diese Werte wurden jeweils gemittelt, was anhand der schwarzen Linie zu sehen ist.

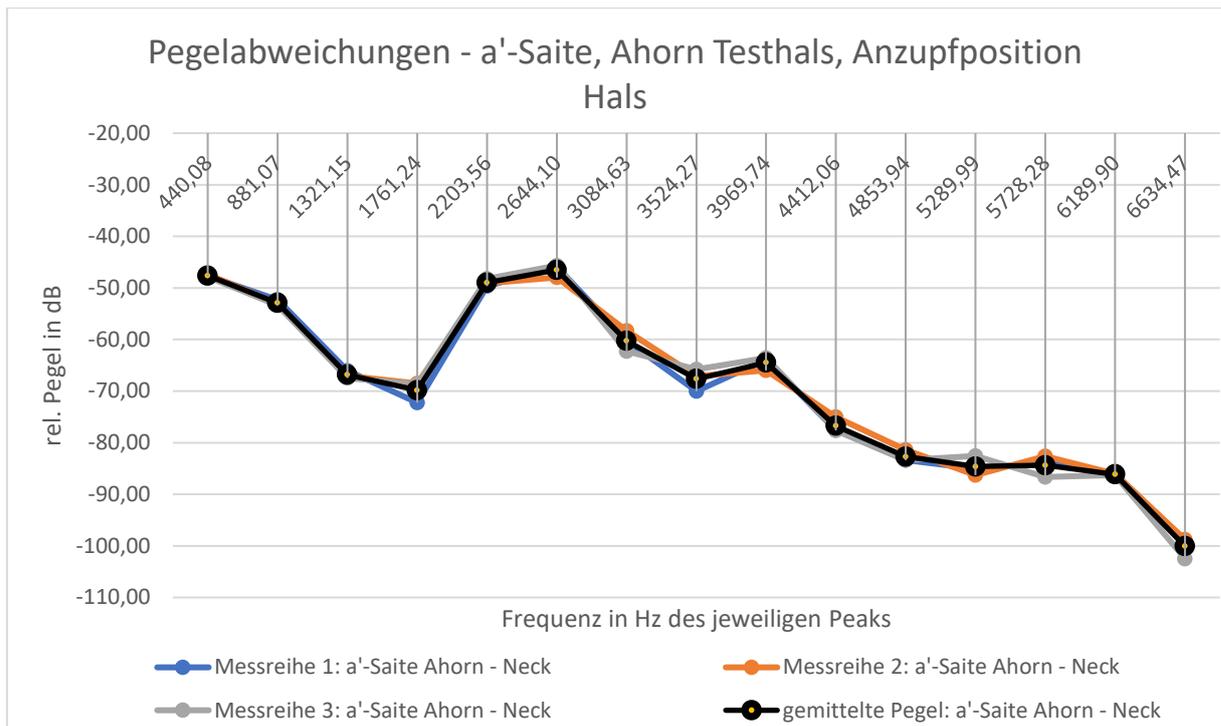


Abbildung 22: Beispiel eines Liniendiagramms zur Mittelung der Pegelabweichungen dreier Messreihen

5 Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die gesammelten Messergebnisse abschließend dargestellt, ausgewertet und diskutiert. Anfangs werden die mit dem *Lucchimeter* erhaltenen Werte vorgestellt und in Diagrammen miteinander verglichen und die Zweipunktübertragungskurven ausgewertet und diskutiert. Daraufhin werden die Messergebnisse der Audioaufnahmen anhand von Frequenzspektren und den daraus erstellten Diagrammen auf klangliche Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten untersucht. Abschließend wird der Einfluss der Hals- und Korpushölzer auf das Sustain dargestellt und ausgewertet.

5.1 Auswertung der Materialeigenschaften der Halshölzer

5.1.1 Lucchimeter

Die mit dem *Lucchimeter* erfassten Daten und die daraus errechneten Werte der Materialeigenschaften der drei Halshölzer können der Tabelle 3 entnommen werden. Die folgende Auswertung und Diskussion ist in einzelne Abschnitte zu den jeweiligen Werten unterteilt und wird anhand von Diagrammen veranschaulicht.

Tabelle 4: Materialkennwerte aus Lucchimeter-Messungen

Merkmale	c_l/ms^{-1}	c_q/ms^{-1}	V/cm^3	ρ/gcm^{-3}	E_l/GPa	E_q/GPa	AK_l	AK_q
Ahorn	4866	2219	815	0,681	16,1	3,35	7,15	3,26
Erle	4875	1498	612	0,533	12,7	1,2	9,15	2,81
Mahagoni	4999	2155	796	0,589	14,7	2,74	8,49	3,66

Maßeinheit Akustische Konstante AK $m^4kg^{-1}s^{-1}$

Schallgeschwindigkeit

In Abbildung 23 wird die Schallgeschwindigkeit c (in m/s) längs und quer zur Faser der Halshölzer dargestellt. Meinel erläutert in seiner Studie „Lehrbrief Musikalische Akustik“: *„Im Sinne günstiger akustischer Eigenschaften (gute Abstrahlung) ist im Allgemeinen eine hohe Steifigkeit bei geringstmöglichem Gewicht anzustreben. Dies entspricht einer hohen Schallgeschwindigkeit.“* (Meinel 2014, S.57). Der Hals leistet dagegen nur einen geringen Beitrag zur Schallabstrahlung (vgl. Meinel 2014, S. 59). Während man im Vergleich der Schallgeschwindigkeit längs zur Faser nur kleine Unterschiede ausmachen kann, hier liegt Khaya Mahagoni mit 4999 m/s knapp vor Erle und Ahorn, die sich nur um 9 m/s unterscheiden, kann man bei der Schallgeschwindigkeit quer zur Faser größere Unterschiede fest machen. Hier liegen Ahorn mit 2219 m/s und Khaya Mahagoni mit 2155 m/s sehr nah beieinander, im Vergleich zur Erle, diese liegt bei 1498 m/s, stechen sie aber klar hervor.

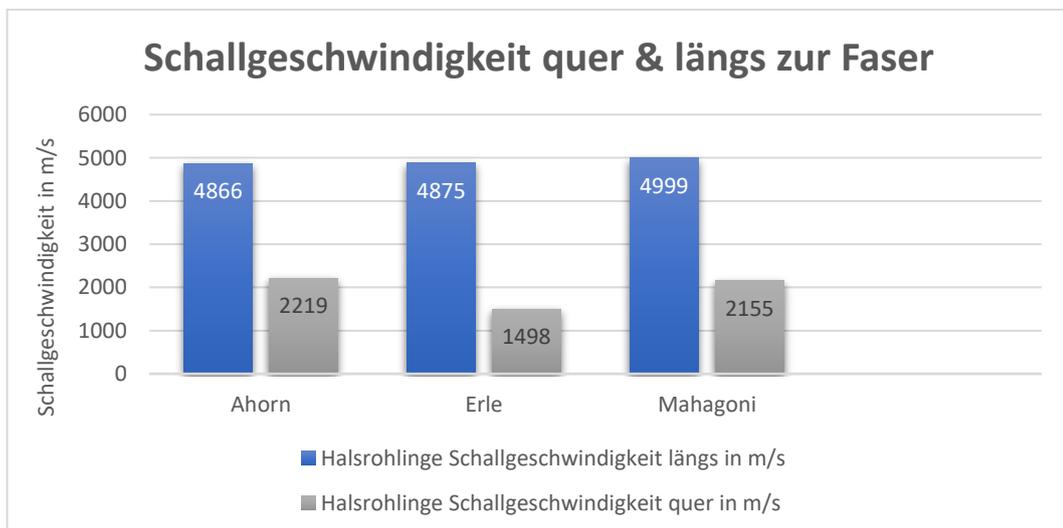


Abbildung 23: Vergleich: Schallgeschwindigkeit in m/s längs & quer zur Faser

Volumen und Masse

In Abbildung 24 werden das Volumen und die Masse der Halsrohlinge betrachtet. Über das Volumen kann an dieser Stelle keine vergleichende Aussage getroffen werden, da die Halsrohlinge zum Zeitpunkt der *Lucchimeter*-Messungen unterschiedliche Maße aufwiesen. Aus diesem Grund wurde später die Masse der fertigen Hälse gemessen (s. Tabelle 5). Hier zeigt sich, dass Ahorn (323 g) und Khaya Mahagoni (320 g) sehr nah beieinander liegen und die Erle mit 304 g schon wesentlich leichter ausfällt. Meinel schreibt, „Zuviel Masse macht das Instrument kopflastig.“ (Meinel 2014, S. 59), gibt aber ein Optimum zwischen den Extremen schwer und leicht an (vgl. Meinel 2014, S. 59).

Tabelle 5: Masse ausgearbeiteter Testhälse & der Halsrohlinge

Holzart	Ahorn	Erle	Khaya
Masse ausgearbeiteter Hälse in g	323	304	320
Masse Halsrohlinge in g	555	326	469

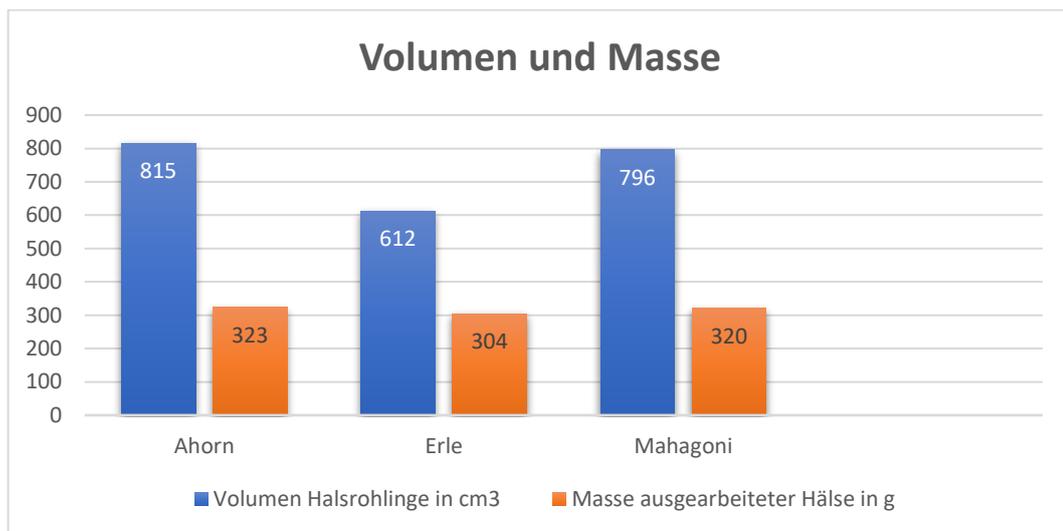


Abbildung 24: Vergleich: Volumen in cm³ & Masse in g

Rohdichte

Abbildung 25 gibt eine Übersicht der gemessenen Rohdichten im Vergleich zu minimalen als auch maximalen Werten der GD Holz (2021). Der Vergleich zeigt hier, dass die Ahorn- und Erlerohlinge zwischen den minimalen und maximalen Rohdichten der GD Holz (2021) liegen. Das Mahagoni ist dagegen mit 0,589 g/cm³ leicht über dem Maximum von 0,57 g/cm³. Die Ausprägung der Rohdichte der Halsrohlinge spiegelt sich im Wesentlichen auch in der Masse der fertigen Testhälse wider, wobei der große Unterschied der Rohdichte zwischen Ahorn und

Khaya Mahagoni, dieser liegt bei $0,92 \text{ g/cm}^3$, im Vergleich zur Masse sehr viel geringer ausfällt, hier ist der Testhals aus Ahorn gerade mal 3 g schwerer.

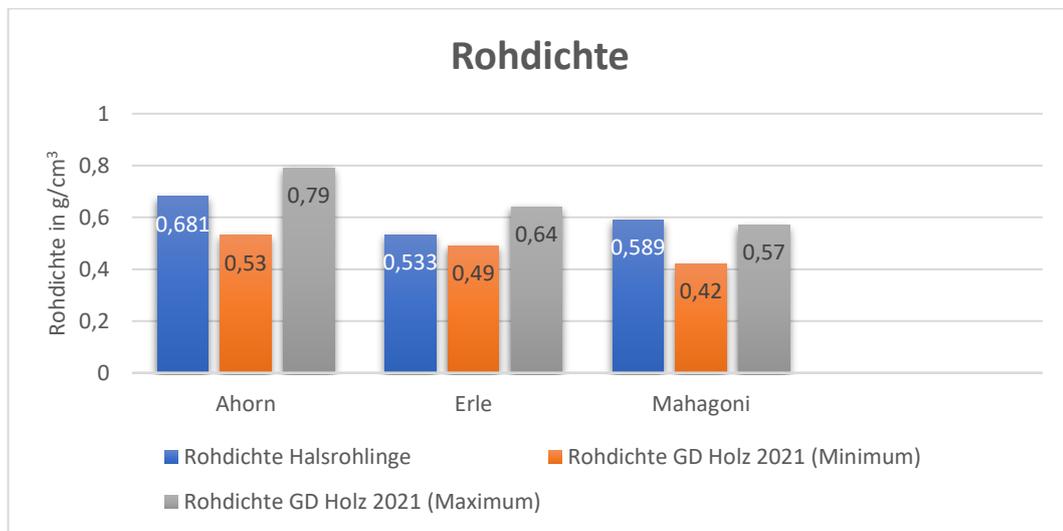


Abbildung 25: Vergleich: Rohdichte in g/cm^3

E-Modul

Die Abbildungen 26 und 27 geben einen Überblick über den E-Modul längs und quer zur Faser. Vergleichend wurden hier sowohl minimale als auch maximale Angaben zum E-Modul längs zur Faser der GD Holz (2021) angegeben. Der Vergleich zeigt, dass alle vermessenen Halsrohlinge über den angegebenen Maximalwerten liegen. Vor allem Ahorn mit 16,1 GPa, aber auch Khaya Mahagoni mit 14,7 übersteigen die Werte um ein Vielfaches. Schaut man sich dagegen die Materialkennwerte von Haines (1979, 1980, 2000) an (s. Tabelle 6), so ergeben sich für Ahorn längs zur Faser 8,6 – 13 GPa und für Afrikanisches Mahagoni 12 – 15 GPa (vgl. Meinel 2014, S. 57). Quer zur Faser liegen die Werte von Haines (1979, 1980, 2000) beim Ahorn zwischen 1,8 – 2,5 GPa und beim Afrikanischen Mahagoni zwischen 9,3 – 1,2 GPa (vgl. Meinel 2014, S. 57) und damit auch wieder weit unterhalb der vorliegenden Halshölzer.

Zum E-Modul lässt sich festhalten, dass es sich bei den vorliegenden Halshölzern entweder um ausgesprochen gutes Holz, im Sinne der Steifigkeit, handeln muss oder die Messungen fehlerhaft sind, wobei hier der Fehler schon bei der Schallgeschwindigkeit zu suchen wäre, über die ja, zusammen mit Länge und Dichte, der E-Modul bestimmt wird (s. Kapitel 4.2.1.1). Ziegenhals erklärt sich die höheren Werte durch zwei mögliche Tatsachen. Zum einen wird bei der Berechnung der Schallgeschwindigkeit die ‚Poissonsche‘ Zahl vernachlässigt, zum anderen misst das Lucchimeter stets nur den Spätholzanteil. Daraus ergibt sich für Ziegenhals

bei den *Lucchimeter*-Messungen ein E-Modul, dass ca. 20 % höher ausfällt, als es bei der Bestimmung des E-Modul im Biegeversuch der Fall wäre (vgl. Ziegenhals 2017, S. 68).

Tabelle 6: E-Moduln längs & quer zur Faser von Haines (Meinel 2014, S. 57)

Holzart	Ahorn	Afrikanisches Mahagoni
E-Modul längs zur Faser in GPa	8,6 – 13	12 – 15
E-Modul quer zur Faser in GPa	1,8 – 2,5	0,93 – 1,2

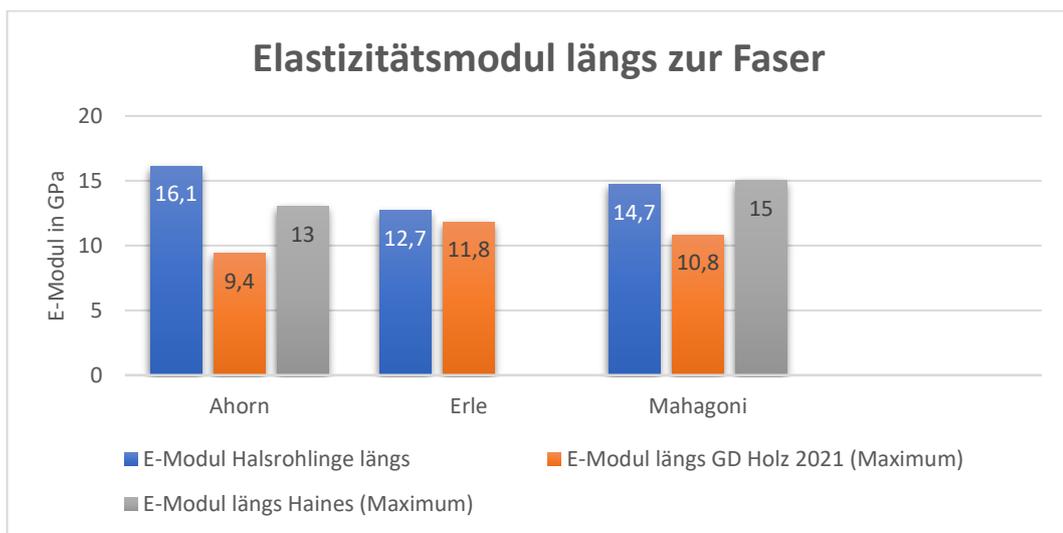


Abbildung 26: Vergleich: Elastizitätsmodul in GPa längs zur Faser

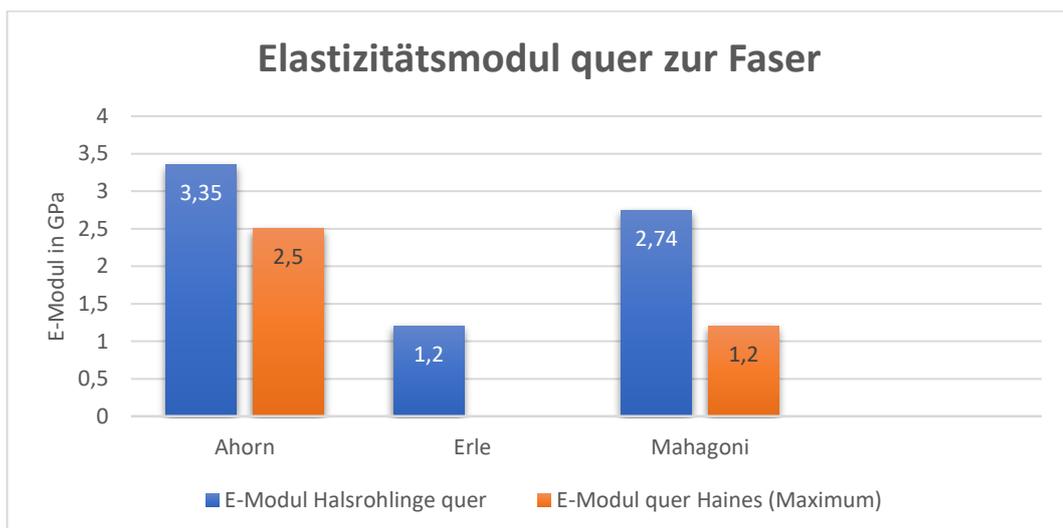


Abbildung 27: Vergleich: Elastizitätsmodul in GPa quer zur Faser

Akustische Konstante

Ziegenhals beschreibt die Akustische Konstante „[...] als die wesentliche Größe zur Beschreibung der Schallabstrahlung von Platten in Abhängigkeit von den Materialparametern Elastizitätsmodul und Dichte [...]“ (Ziegenhals 2017, S. 74). Da es sich bei den vermessenen Halsrohlingen, und den später ausgearbeiteten Hälsen, keineswegs um Platten handelt und die Schallabstrahlung der Hälse zu vernachlässigen ist (vgl. Meinel 2014, S. 59), wird hier nicht weiter auf die Akustische Konstante eingegangen. Die Werte längs und quer zur Faserrichtung können der Abbildung 28 entnommen werden.

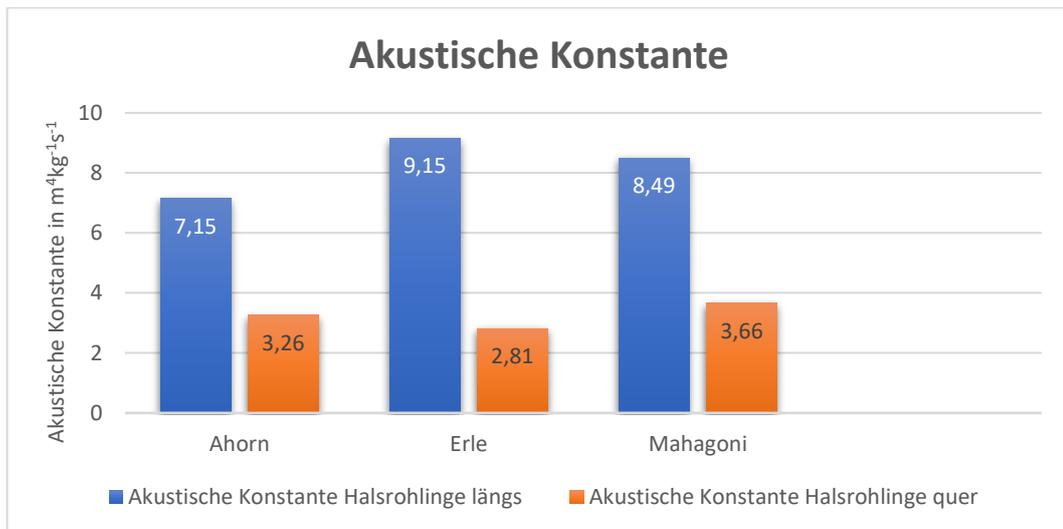


Abbildung 28: Vergleich: Akustische Konstante in $m^4kg^{-1}s^{-1}$ längs & quer zur Faser

5.1.2 Zweipunktübertragungskurve

Im Folgenden werden jeweils die Zweipunktübertragungskurven bzw. Frequenzgänge der drei Testhälse in einem Diagramm (s. Abbildung 29) und in einem anderen die drei Frequenzgänge des spiefertigen Instruments in Kombination mit den drei Testhälsen (s. Abbildung 30) zusammengefasst und miteinander verglichen und ausgewertet. Die Kurven der einzelnen Testhälse und der spiefertigen Instrumente können dem Anhang entnommen werden.

Abbildung 29 veranschaulicht die Frequenzgänge der drei Hälse im Vergleich. Alle drei Hälse bilden einen recht ähnlichen Kurvenverlauf. Dabei fallen vor allem die ersten drei Moden bis ca. 1000 Hz ins Auge (s. auch Tabelle 7). Während bei der ersten Mode, bei ca. 380 Hz, Frequenz und Pegel der Erle und des Khaya Mahagonis noch nahezu identisch sind, fällt der Ahorn um knapp 10 Hz zurück. Der Verlauf der nächsten beiden Moden zeigt zwar noch eine recht ähnliche Tendenz, allerdings weisen hier die drei Hölzer sowohl große Frequenz- als auch Pegelabweichungen auf, um ab ca. 1500 Hz stark voneinander abzuweichen.

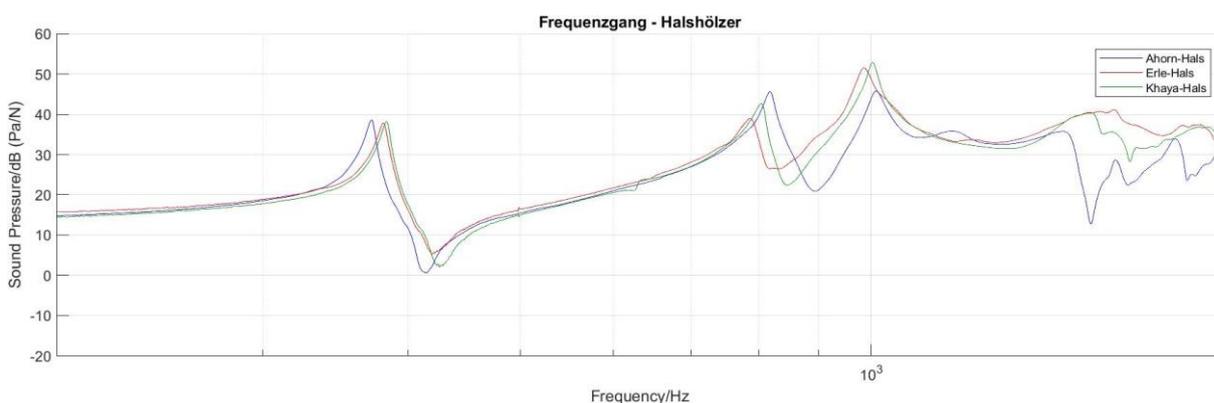


Abbildung 29: Frequenzgänge aller Halshölzer

Tabelle 7: Frequenzgänge der Halshölzer: Frequenzen (in Hz) der ersten drei Moden

	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Ahorn	373,125 Hz	818,75 Hz	1009,375 Hz
Erle	381,875 Hz	787,5 Hz	985,625 Hz
Mahagoni	384,375 Hz	805 Hz	1003,125 Hz

Abbildung 30 zeigt die Frequenzgänge der drei spiefertigen Instrumente im Vergleich. Die Werte der Moden können Tabelle 8 entnommen werden. Hier fällt sofort die stark ausgeprägte erste Mode bei ca. 128 Hz ins Auge, wobei es hier kaum Abweichungen zwischen den Hölzern gibt. Diese Mode könnte die erste Halsresonanz abzeichnen, die bei Gitarren um etwa 75 Hz

anzutreffen ist (Meinel 2014, S. 59). Da es sich bei dem hier vorliegenden Instrument aber um eine E-Ukulele handelt, liegt die Vermutung nahe, dass sich hier die Frequenz der ersten Halsresonanz durch den stark verkürzten Hals nach oben verschoben hat.

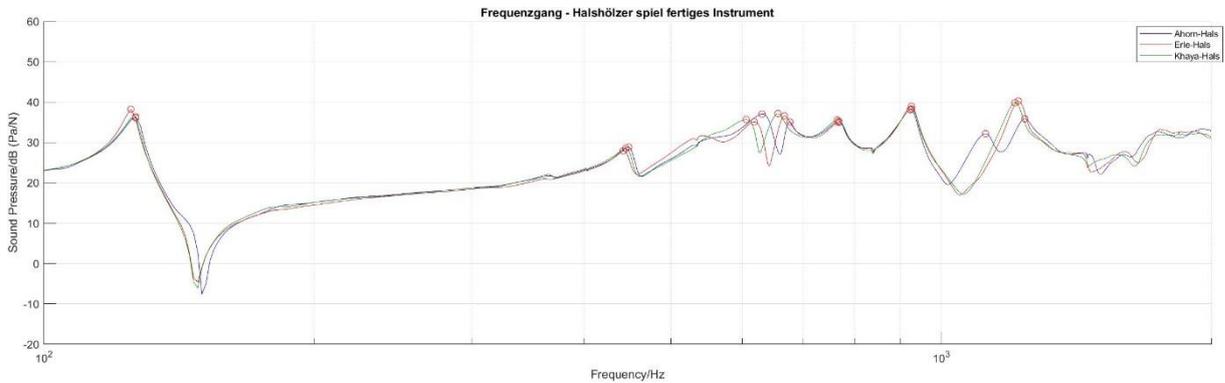


Abbildung 30: Frequenzgänge aller Hälse am spielfertigen Instrument

Tabelle 8: Frequenzgänge aller Hälse am spielfertigen Instrument: Frequenz (in Hz) der ersten 7-8 Moden

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6	Mode 7	Mode 8
Ahorn	128,1	450	632,8	679,7	770,3	925	1121,9	1240,6
Erle	126,6	443,8	620,3	670,3	770,3	928,1		1220,3
Mahagoni	128,1	446,9	607,8	659,4	767,2	928,1		1209,4

Auch die Moden bei ca. 445 Hz, 770 Hz und 928 Hz weisen kaum Abweichungen auf. Große Abweichungen finden sich dagegen bei den Moden 3 und 4 zwischen 600 – 680 Hz. Hier lässt sich zwar eine Tendenz ausmachen, die Position und Ausprägung der einzelnen Moden ist jedoch bei allen drei Hölzern verschoben. Die achte Mode ist dagegen bei Erle und Khaya Mahagoni wieder nahezu identisch ausgeprägt. Beim Ahorn scheint jedoch diese in zwei Moden (7 & 8) gespalten zu sein, wobei die jeweiligen Pegel in ihrer Amplitude nicht so stark ausgeprägt sind wie bei der achten Mode der anderen beiden Hölzer.

Im Vergleich der Frequenzgänge der Abbildungen 29 und 30 fällt auf, dass die starken Abweichungen der Frequenzgänge der einzelnen Hälse (Abbildung 29) kaum noch in den Frequenzgängen der spielfertigen Instrumente (Abbildung 30) auszumachen sind. Diese Schwingungsabweichungen werden anscheinend durch den Einfluss des Korpus und der anderen Bestandteile verringert. Allerdings lassen sich gerade bei den Moden 3 und 4 und den Moden 7 und 8 (nur beim Ahorn) die Einflüsse der unterschiedlichen Halsschwingungen ausmachen.

5.2 Einfluss der Halshölzer auf den Klang: Auswertung der Frequenzspektren

Im folgenden Kapitel soll nun abschließend geklärt werden, ob und inwieweit Klangunterschiede aufgrund der drei vermessenen Halshölzern auszumachen sind. Ausgehend von der Aussage, dass „[...] die von einem Klang empfundene Klangfarbe nur durch die Amplituden der Teiltöne bedingt wird.“ (vgl. Ziegenhals 2017, S. 141), soll das Augenmerk bei der Auswertung der Frequenzspektren auf die Ausprägung der Teiltonamplituden gelegt werden (s. auch Kapitel 4.2.2.1: *Was ist Klang?*). Anhand einer kleinen Auswahl von Frequenzspektren – lediglich der g- und a'-Saite – werden Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Teiltonamplituden vergleichend ausgewertet. Im Fokus der Auswertung und Diskussion stehen aufgrund ihrer Übersichtlichkeit die erstellten Liniendiagramme.

Eine Auswahl weiterer Frequenzspektren zu den jeweiligen Leersaiten kann dem Anhang entnommen werden. Eine komplette Übersicht befindet sich auf dem beiliegenden Datenträger unter *Bachelorthesis_erzeugte_Frequenzspektrum_&_Peakwerte*.

5.2.1 Auswertung der Frequenzspektren anhand der g- und e'-Leersaiten

Im Folgenden werden die Abweichungen und Gemeinsamkeiten der Teiltonamplituden der vermessenen g- und e'-Saite ausgewertet und diskutiert, inwieweit die verschiedenen Halshölzer, Anzupfpositionen oder die Einflussnahme des ‚Tone‘-Potentiometers den Klang beeinflussen.

g-Saite

Die Abbildungen 31 – 33 zeigen Frequenzspektren der Messreihe 1 aller Halshölzer, angezupft an der ‚Bridge‘-Position, und die Abbildungen 34 – 36 zeigen Frequenzspektren der Messreihe 1 des Ahornhalses, jeweils angezupft an der Hals- und ‚Bridge‘-Position und der zusätzlichen Einflussnahme des ‚Tone‘-Potentiometers. Schaut man sich die Spektren an, fällt der erste ausgeprägte Peak bei ca. 196 Hz auf, welcher die Frequenz des Grundtons (g bei 196 Hz) beschreibt. Auf diesen folgen die Obertöne. Im Vergleich der Halshölzer in den Abbildungen 31 – 33 zeichnet sich ein Grundaufbau der Teiltöne ab, der optisch kaum Abweichungen aufweist.

Betrachtet man dagegen die Abbildungen 34 – 36 fallen große Abweichungen der Teiltonamplituden auf. Gerade im Vergleich zur Einflussnahme des ‚Tone‘-Potentiometers lassen sich große Amplitudenunterschiede feststellen. Bereits ab 1000 Hz fallen die Pegel der einzelnen Teiltöne erheblich ab.

Frequenzspektren g-Saite: Halshölzer im Vergleich

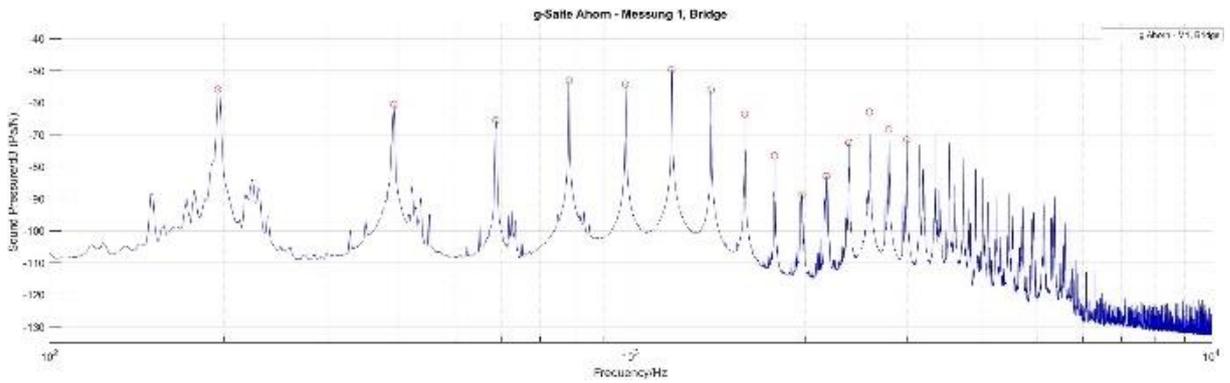


Abbildung 31: Frequenzspektrum g-Saite, Ahorn Testhals, Anzupfposition ,Bridge'

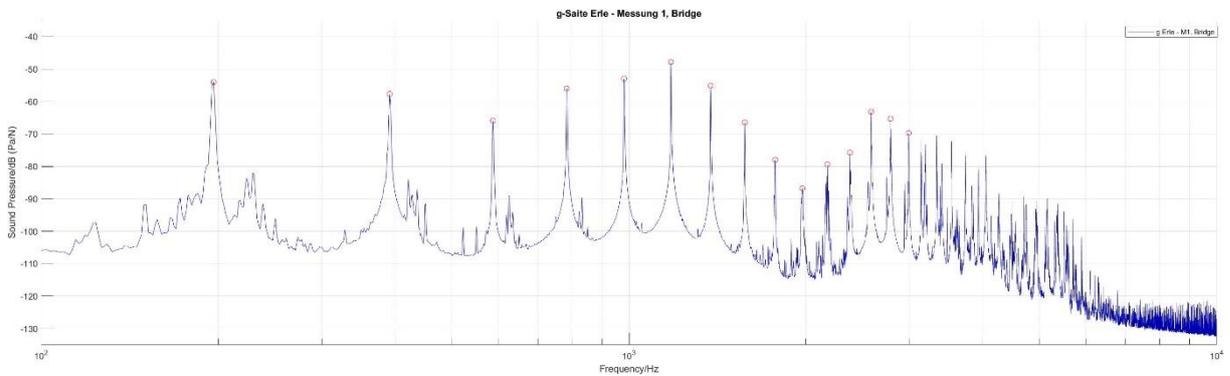


Abbildung 32: Frequenzspektrum g-Saite, Erle Testhals, Anzupfposition ,Bridge'

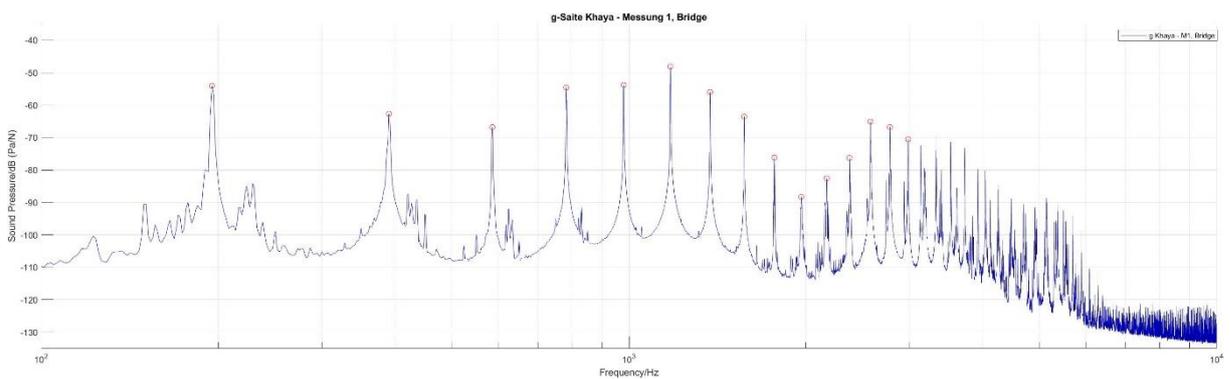


Abbildung 33: Frequenzspektrum g-Saite, Khaya Mahagoni Testhals, Anzupfposition ,Bridge'

Frequenzspektren g-Saite: Anzupfpositionen und Einfluss des ‚Tone‘-Potentiometers im Vergleich

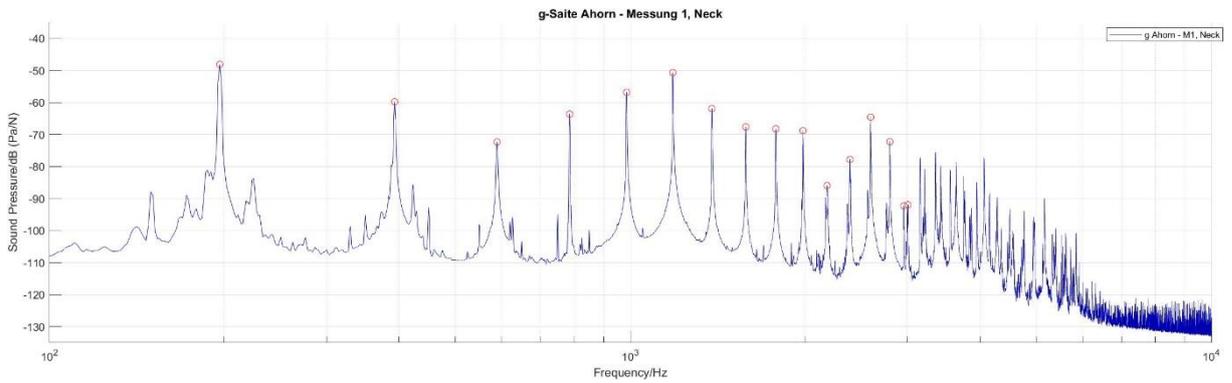


Abbildung 34: Frequenzspektrum g-Saite, Ahorn Testhals, Anzupfposition Hals

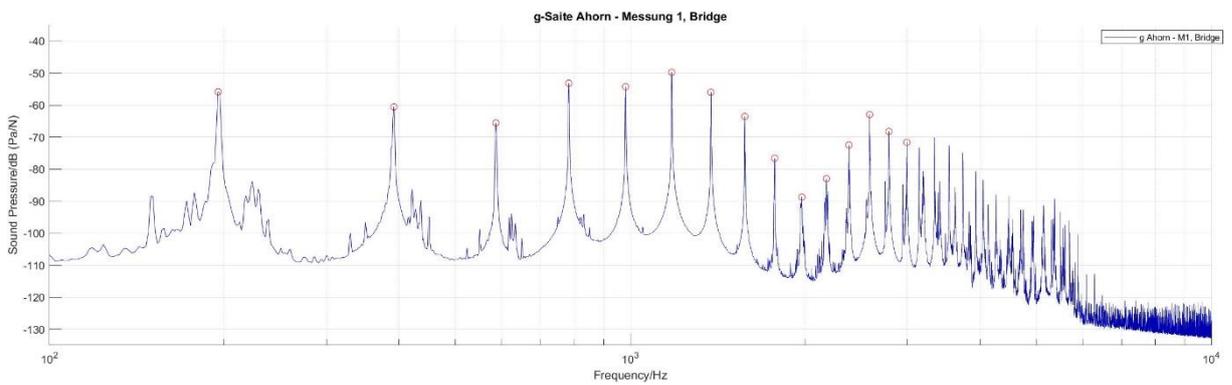


Abbildung 35: Frequenzspektrum g-Saite, Ahorn Testhals, Anzupfposition ‚Bridge‘

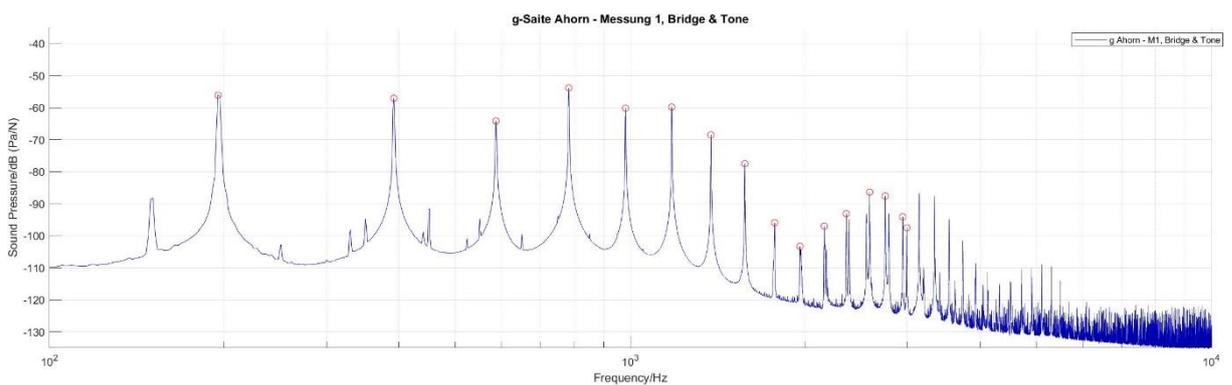


Abbildung 36: Frequenzspektrum g-Saite, Ahorn Testhals, Anzupfposition ‚Bridge‘ & Einfluss ‚Tone‘-Potentiometer

Schaut man sich alle an der g-Saite durchgeführten Messungen im Liniendiagramm an (s. Abbildung 37), werden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede erst richtig klar. Während die jeweils drei untereinander vermessenen Halshölzer nur kleinste Abweichungen aufweisen, lassen sich dagegen erhebliche Abweichungen zwischen den Anzupfpositionen und der Einflussnahme des ‚Tone‘-Potentiometers feststellen. Hier lässt sich also schon festhalten, dass die Wahl der Anzupfposition bereits einen größeren Einfluss auf Aufbau und Amplitude der Teiltöne und somit auf den Klang zu haben scheint, als die Wahl des Holzes. Vor allem der Vergleich zum Einfluss des ‚Tone‘-Potentiometers, dessen Teiltöne ab 1000 Hz erheblich abfallen, macht dies deutlich.

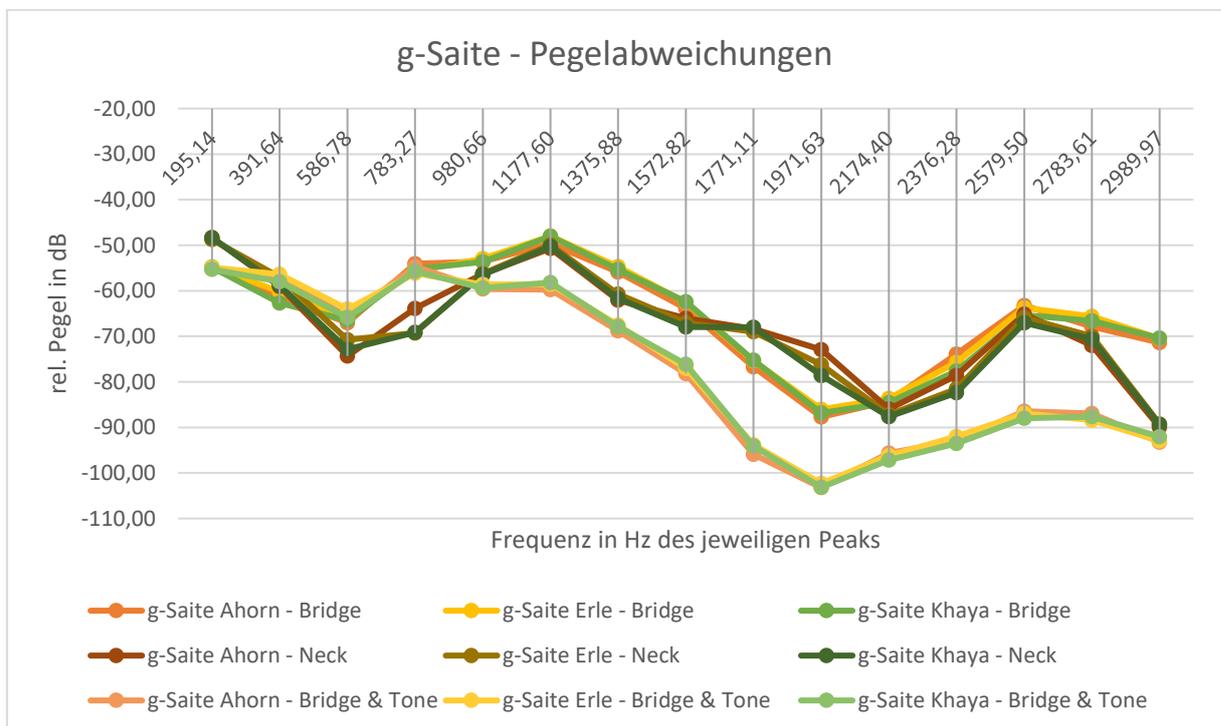


Abbildung 37: Liniendiagramm: g-Saite – Pegelabweichungen der Halshölzer und Anzupfpositionen

e'-Saite

Das Liniendiagramm aller an der e'-Saite durchgeführten Messungen bekräftigt diese Aussage nochmals (Abbildung 38): Im Vergleich der Halshölzer untereinander lassen sich nur kleinste Abweichungen der Teiltöne ausmachen, wohingegen die Anzupfpositionen und vor allem die zusätzliche Einflussnahme des ‚Tone‘-Potentiometers im Vergleich erhebliche Abweichungen der Teiltonamplituden erkennen lassen.

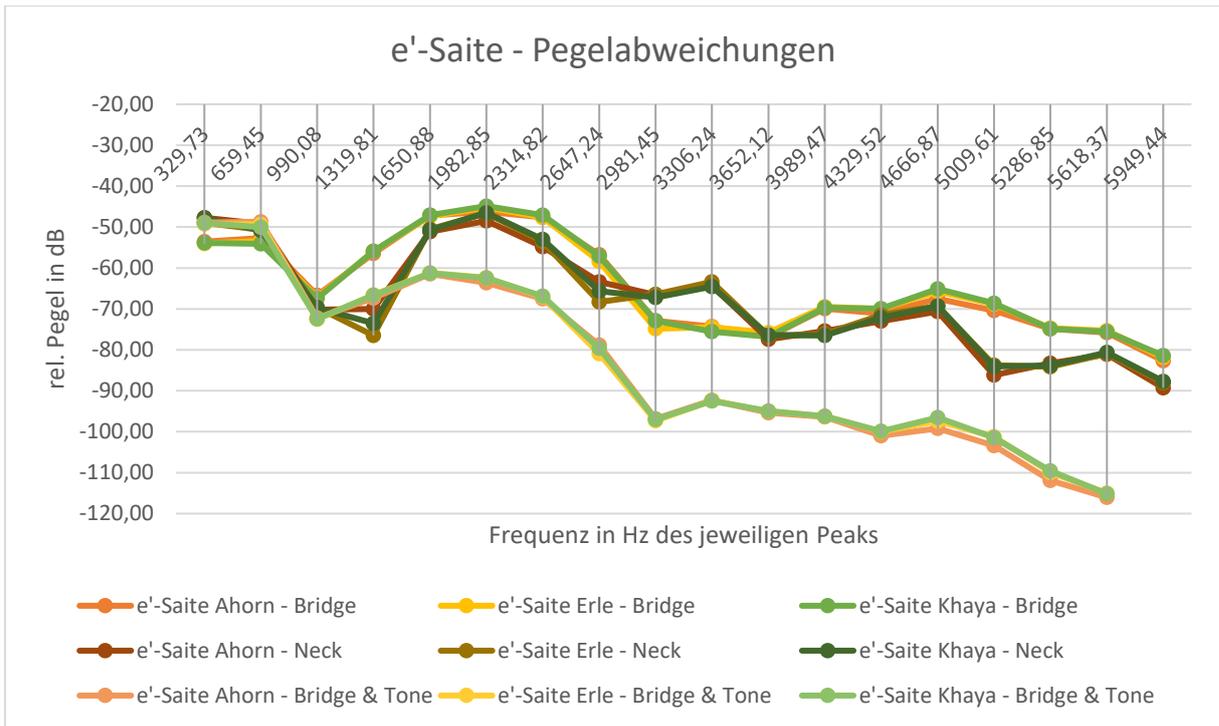


Abbildung 38: Liniendiagramm: e'-Saite - Pegelabweichungen aller Halshölzer & Anzupfpositionen

5.2.2 Auswertung der Frequenzspektren anhand der a'- und c'-Leersaiten

Im Folgenden werden die Abweichungen und Gemeinsamkeiten der Teiltonamplituden der vermessenen a'- und c'-Saite ausgewertet und diskutiert.

a'-Saite

Betrachtet man dagegen die Frequenzspektren der Abbildungen 39 – 41 der a'-Saite, so fallen hier größere Abweichungen der Halshölzer im Vergleich auf. Während der Grundton (440 Hz) und die ersten fünf Obertöne bis etwa 2640 Hz kaum voneinander abweichen, fallen dagegen in den höheren Frequenzbereichen einzelne Obertöne durch unterschiedliche Amplituden auf. Der Vergleich der Frequenzspektren der Abbildungen 42 – 44 zeigt dagegen wieder deutlich den Einfluss durch Anzupfposition und ‚Tone‘-Potentiometers auf die Ausprägung der Teiltonamplituden. Hier unterscheidet sich der Grundaufbau deutlich.

Frequenzspektren a'-Saite: Halshölzer im Vergleich

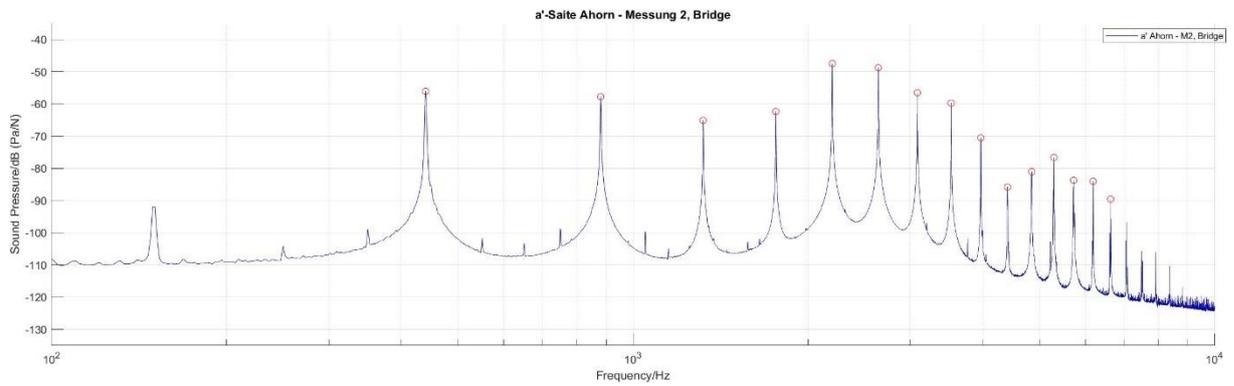


Abbildung 39: Frequenzgang a'-Saite, Ahorn Testhals, Anzupfposition ,Bridge'

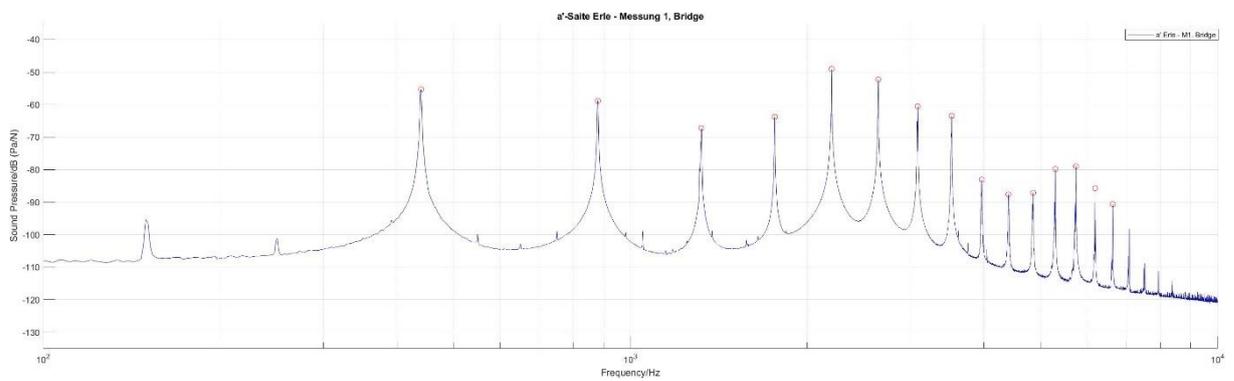


Abbildung 40: Frequenzgang a'-Saite, Erle Testhals, Anzupfposition ,Bridge'

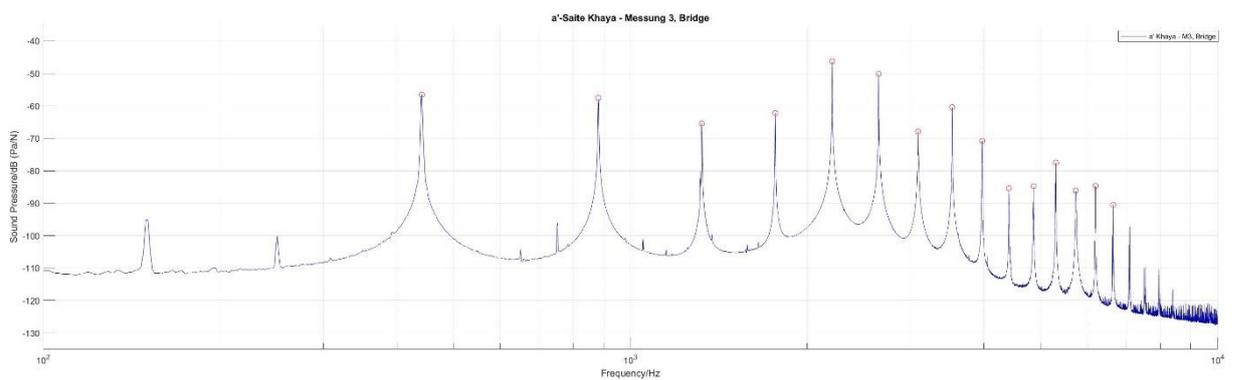


Abbildung 41: Frequenzgang a'-Saite, Khaya Mahagoni Testhals, Anzupfposition ,Bridge'

Frequenzspektren a'-Saite: Anzupfpositionen und Einfluss des ‚Tone‘-Potentiometers im Vergleich

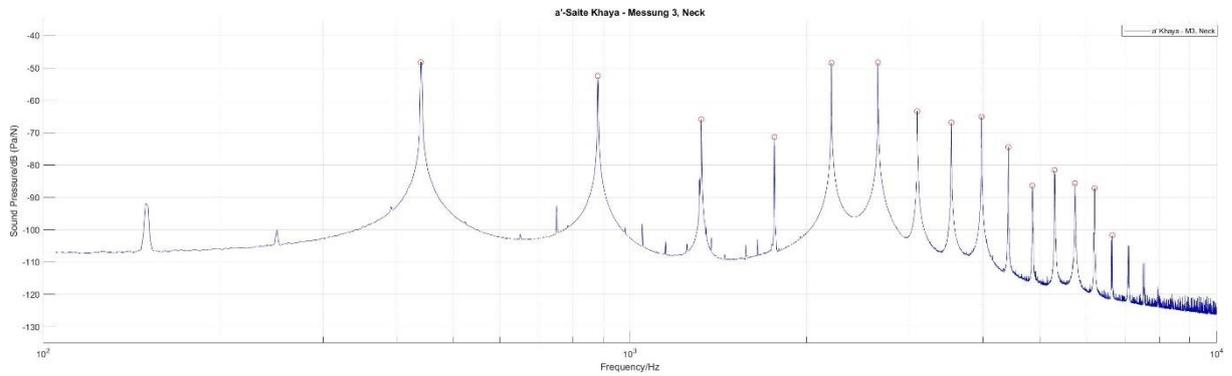


Abbildung 42: Frequenzgang a'-Saite, Khaya Testhals, Anzupfposition Hals

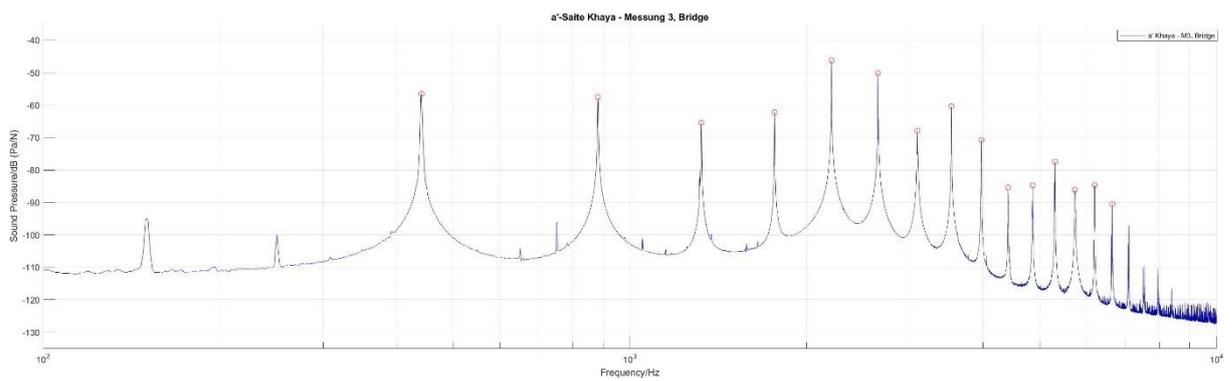


Abbildung 43: Frequenzgang a'-Saite, Khaya Testhals, Anzupfposition ‚Bridge‘

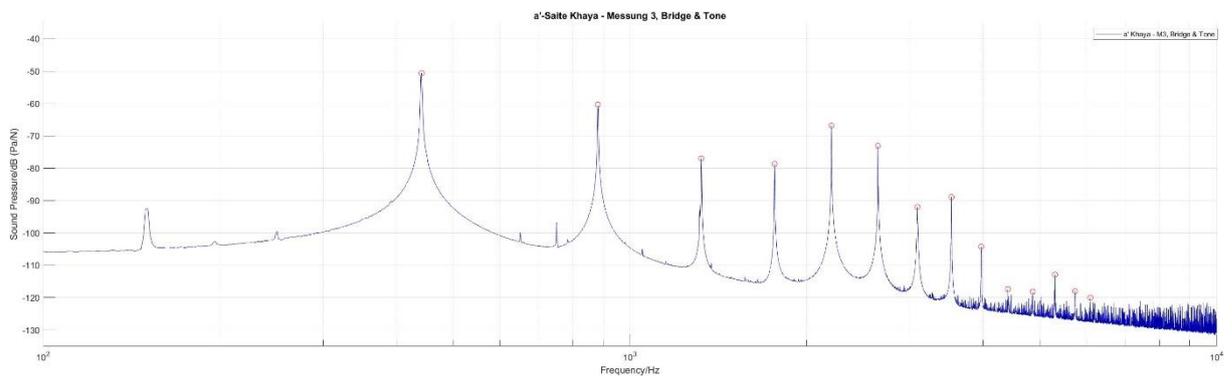


Abbildung 44: Frequenzgang a'-Saite, Khaya Testhals, Anzupfposition ‚Bridge‘ & Einfluss ‚Tone‘-Potentiometer

Bei Betrachtung des Diagramms (Abbildung 45) zum Verlauf der Grund- und Obertonamplituden, fällt im Vergleich der Anzupfpositionen an Hals und ‚Bridge‘ eine erste Aussage schwer. Dagegen ist der Verlauf aller drei Hölzer durch den Einfluss des ‚Tone‘-Potentiometers nahezu identisch und lässt auch hier die Aussage zu, dass das Holz nur einen eher geringen Einfluss hat.

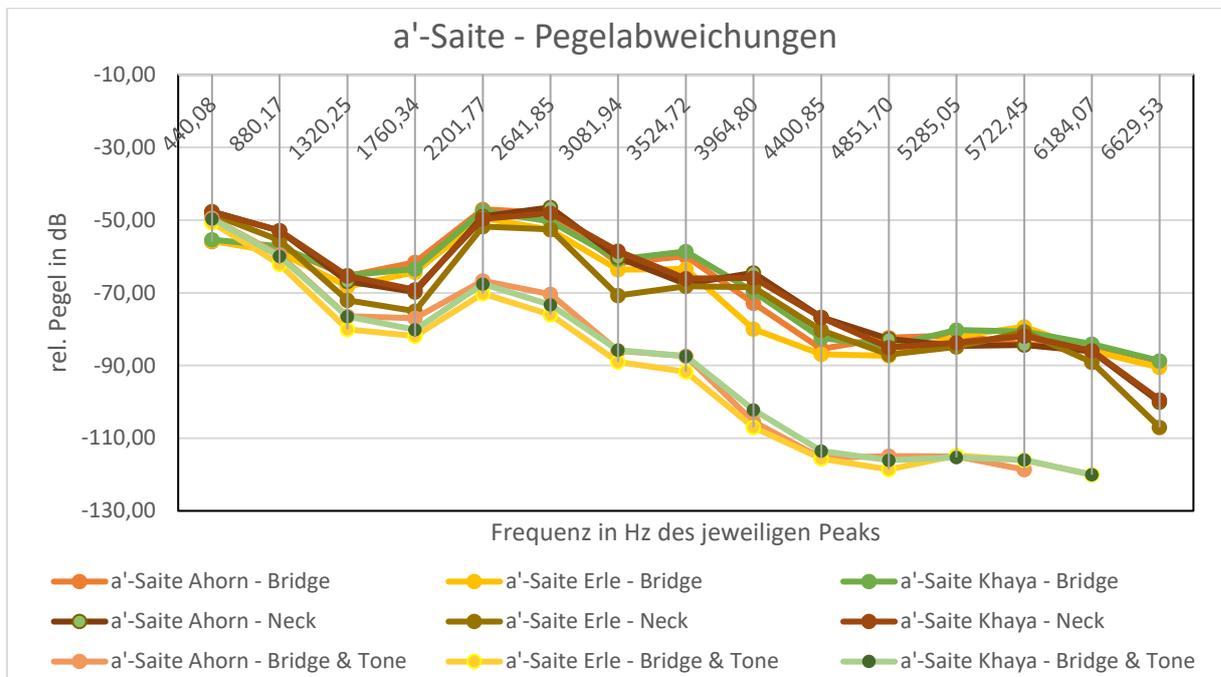


Abbildung 45: Liniendiagramm: a'-Saite - Pegelabweichungen aller Halshölzer & Anzupfpositionen

Blendet man jedoch die Verläufe des vermessenen Erle Testhalses aus, so ergeben sich klar vergleichbare Verläufe der anderen beiden Hölzer (Abbildung 46). Also auch beim Ahorn und Khaya Mahagoni sind klangliche Unterschiede nicht auf das Holz zurückzuführen, sondern durch den Ort der Saitenerregung beeinflusst.

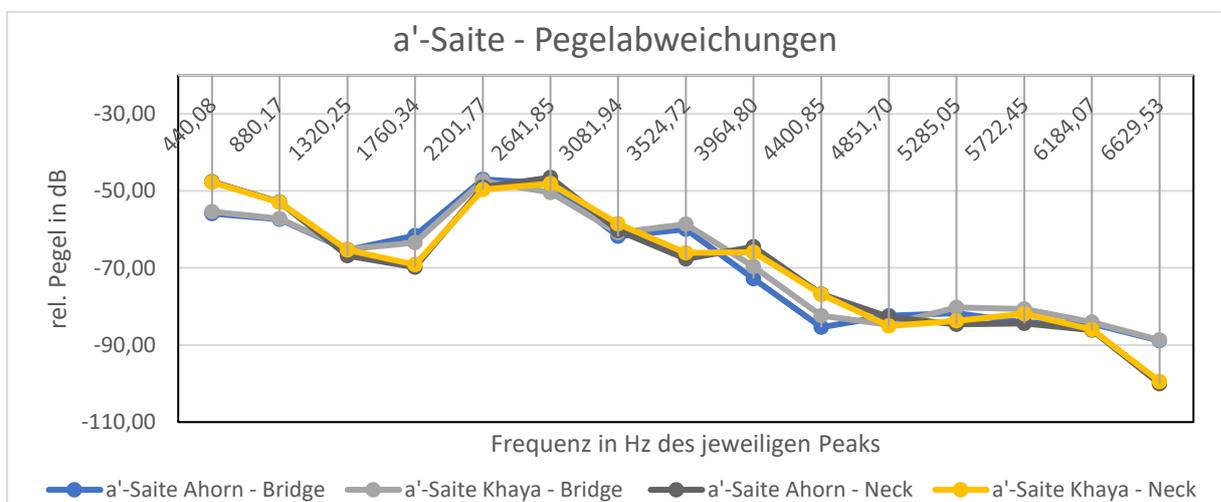


Abbildung 46: Liniendiagramm: a'-Saite - Pegelabweichungen Ahorn & Khaya an Hals & ‚Bridge‘

Demzufolge gibt es bei der vermessenen a'-Saite vor allem beim Erle Testhals größere Abweichungen einzelner Teiltöne als im Vergleich zu Ahorn und Khaya Mahagoni. Abbildung 47 verdeutlicht dies. Eine Schlussfolgerung könnte sein, dass die Erle tatsächlich Einfluss auf den Klang der a'-Saite hat. Unter Berücksichtigung der Messergebnisse der g- und e'-Saite scheint dies aber unwahrscheinlich, denn auch dort hätte es zu ähnlichen Abweichungen kommen müssen. Berücksichtigt man Zollners Aussage, dass die Kopfsattelkerben, in welchen die Saiten geführt werden, „wesentlich an der Klangformung beteiligt“ (Zollner 2010, S. 564) sind, könnte auch die Verantwortung abweichender Ergebnisse beim Kopfsattel gesucht werden: Immerhin wurde jeder der Hälse aus konstruktiven Gründen mit einem eigenen Kopfsattel ausgestattet. Hier können Abweichungen in der Anfertigung der Sattelkerben – insbesondere die der a'-Saite – nicht ausgeschlossen werden.

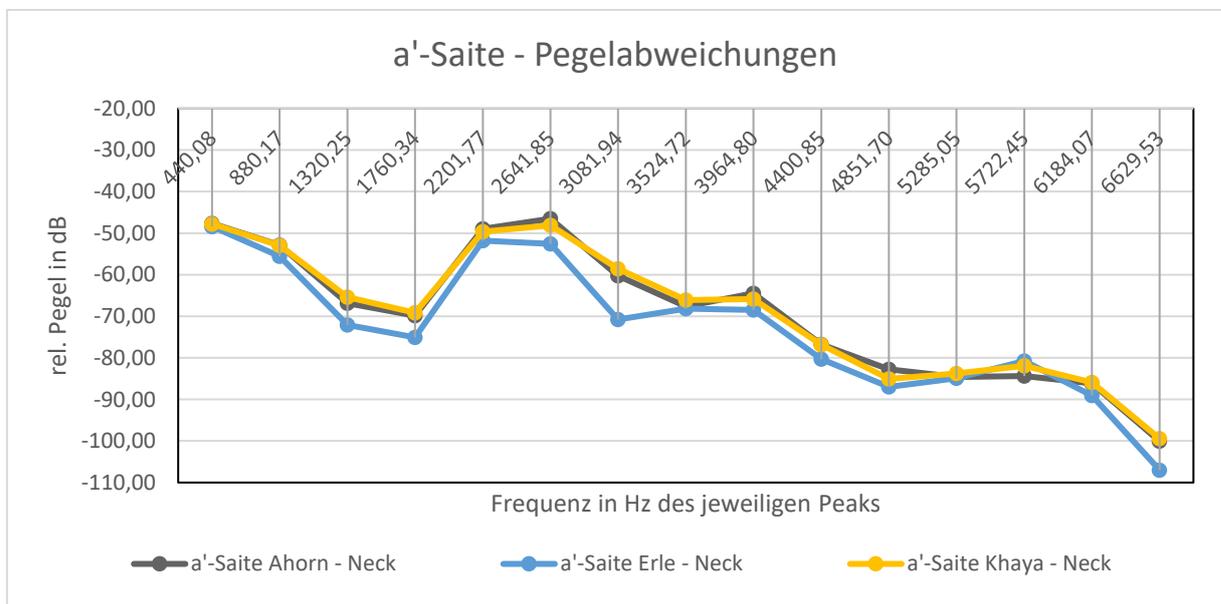


Abbildung 47: Liniendiagramm: a'-Saite - Pegelabweichungen aller Hölzer am Hals

c'-Saite

Auf den ersten Blick fallen bei der vermessenen c'-Saite wiederum größere Abweichungen im Vergleich der Hölzer untereinander auf (Abbildung 48). Allerdings lässt sich hier insgesamt dieselbe Tendenz ablesen, wie man sie schon bei der g- und e'-Saite eindeutig sehen konnte: Der Einfluss der Anzupfposition auf die Ausprägung der Grund- und Obertonamplituden überwiegt den Einfluss des Holzes. Auch hier liegt die Vermutung nahe, dass es zu Abweichungen in der Anfertigung der Sattelkerben für die c'-Saite gekommen ist.

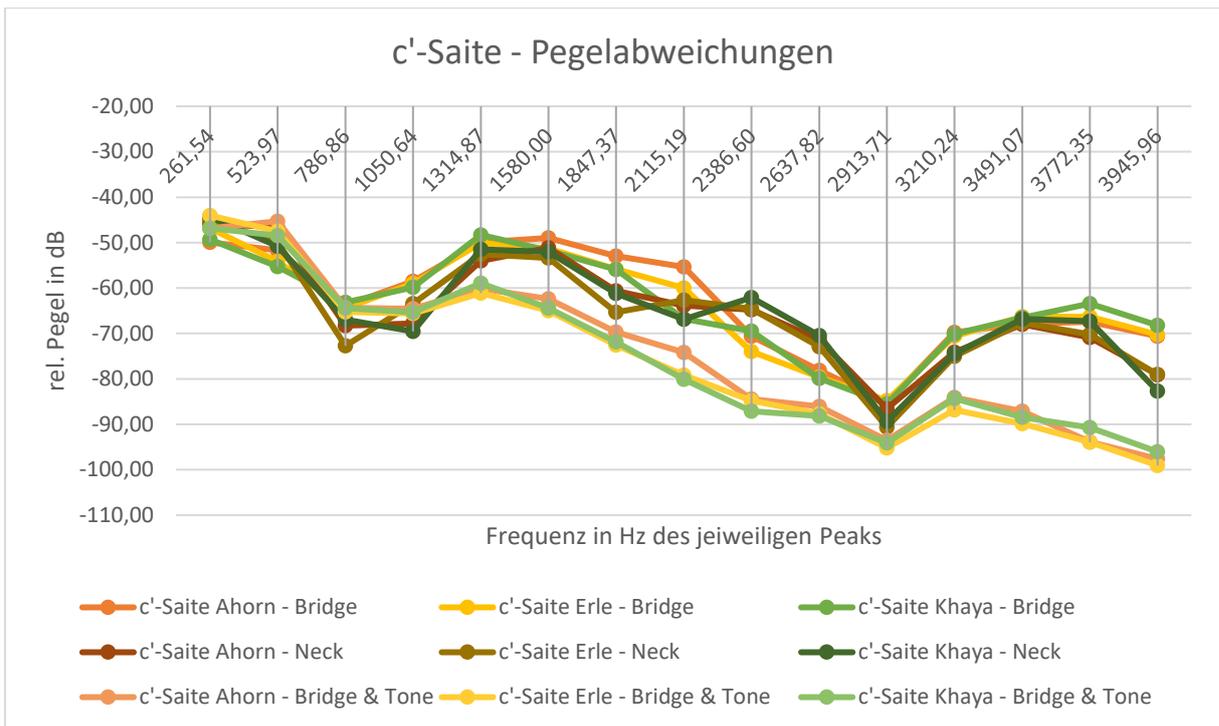


Abbildung 48: Liniendiagramm: c'-Saite - Pegelabweichungen aller Halshölzer & Anzupfpositionen

5.3 Einfluss der Halshölzer auf das Sustain: Auswertung der Audiosignale

Im folgenden Kapitel soll nun der Einfluss der Halshölzer auf das Sustain der einzelnen vermessenen Leersaiten dargestellt und diskutiert werden. Zusätzlich werden die Messdaten der eigenen vorangegangenen Studie „Einfluss des Korpusholzes auf den Klang eines elektrisch verstärkten Zupfinstruments“ (Herzberg 2021) aufgearbeitet, um ergänzend den Einfluss der Korpushölzer auf das Sustain darstellen zu können.

Einleitend soll hierzu eine kurze Anmerkung gemacht werden: Die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse zum Sustain der einzelnen Leersaiten in Verbindung mit den verschiedenen Hals- und Korpushölzern können hier nicht als allgemeingültige Abklingzeiten mit festem Zeitwert angesehen werden. Vielmehr spiegeln diese eine Tendenz des Abklingverhaltens der einzelnen Leersaiten in Verbindung mit den verschiedenen Hals- bzw. Korpushölzern über eine gewisse Zeit im Vergleich untereinander wider. Zollner sagt zum Sustain der E-Gitarre: „Wie lange man die Saiten der unverstärkten Gitarre klingen hört, sagt weder etwas über deren mechanische Bedämpfung, noch über das Sustain der über Verstärker gespielten Gitarre.“ (Zollner 2010, S. 583). Da also die Messungen, die dieser Arbeit zugrunde liegen, über einen Gitarrenverstärker verstärkt und aufgenommen wurden, sagen diese nichts über das eigentliche Sustain der unverstärkten Instrumente aus. Weiter sagt Zollner: „Nimmt man vereinfachend die Hörschwelle bei 10 dB an, und eine Abklingzeit von 6 s, so wird ein

Gitarrenton, der mit 40 dB beginnt, nach 6 s unhörbar. Wenn nun ein in der E-Gitarre angebrachter Hohlraum (Resonator) die Abstrahlung auf 50 dB verbessert, hört man bei gleicher Abklingzeit den Ton 8 s lang. Verstärkt man die Tonabnehmerspannung und lässt einen Lautsprecher 70 dB produzieren, hört man die Saite 12 s lang.“ (Zollner 2010, S. 583). Das Sustain der Saiten einer verstärkten E-Gitarre können also je nach Einstellung des Gitarrenverstärkers stark variieren.

5.3.1 Sustain – Einfluss der Halshölzer

In Abbildung 49 ist das durchschnittliche Sustain aller Leersaiten mit Einflussnahme des jeweiligen Testhalses in einem Diagramm zusammengefasst worden.

Im Vergleich erkennt man, dass das Sustain je nach Testhals recht unterschiedlich ausfallen kann: Der Khaya Mahagoni Hals weist bei der g-, e'- und a'-Saite das längste Sustain auf, fällt dagegen bei der c'-Saite gegenüber den anderen beiden Hälsen um mehr als eine Sekunde zurück. Der Unterschied bei der a'-Saite zum Ahorn Hals ist dagegen im Grunde zu vernachlässigen. Dagegen fällt hier vor allem der erhebliche Unterschied zum Erle Hals auf, bei dem das Sustain um mehr als eine Sekunde kürzer ausfällt. Gerade bei der kurzen Abklingzeit der a'-Saite fallen solch große Abweichungen stark ins Gewicht. Im Vergleich zum Khaya Mahagoni mit 5,00 s ist das Sustain der Erle mit 3,69 s um 26,2 % kürzer.

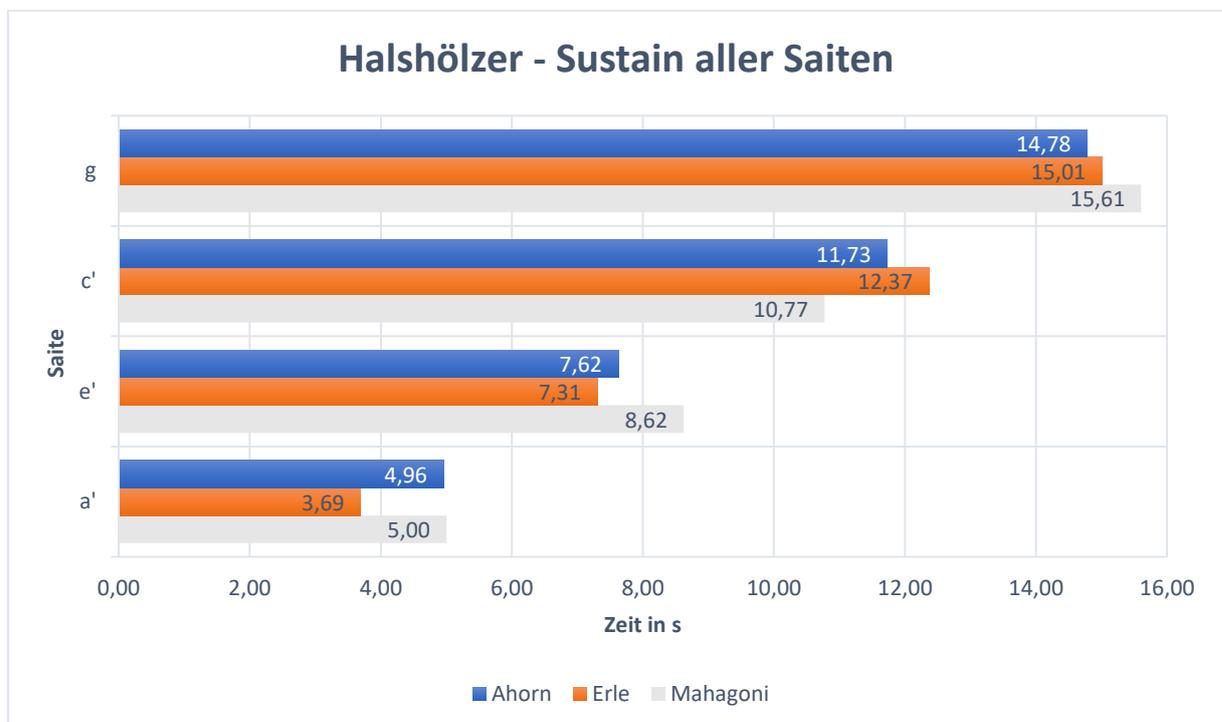


Abbildung 49: Durchschnittliches Sustain aller Leersaiten anhand der drei Testhälse

Zur Beurteilung, welches Holz den größten Einfluss auf das Sustain hat, wurde ein ‚Ranking‘ erstellt. Die Methode wird in Kapitel 4.2.3.2 erläutert. Das ‚Ranking‘ der Halshölzer kann der Tabelle 9 entnommen werden. Nach Verteilung der ‚Ranking‘-Punkte und der Auswertung dieser, kann festgehalten werden, dass der Hals aus Khaya Mahagoni (Platz 1) den größten Einfluss auf das Sustain hat. Ahorn liegt demzufolge auf Platz 2 und Erle auf Platz 3.

Tabelle 9: ‚Ranking‘ Halshölzer - durchschnittliches Sustain der Saiten (in s)

‚Ranking‘ Halshölzer - durchschnittliches Sustain der Saiten (in s)										
	g-Saite		c‘-Saite		e‘-Saite		a‘-Saite		‚Ranking‘	
	<i>d. S.</i>	<i>R.-P.</i>	<i>d. S.</i>	<i>R.-P.</i>	<i>d. S.</i>	<i>R.-P.</i>	<i>d. S.</i>	<i>R.-P.</i>	<i>S. R.-P.</i>	<i>Pltz.</i>
Ahorn	14,78	94,7	11,73	94,8	7,62	88,4	4,96	99,2	377,1	2
Erle	15,01	96,2	12,37	100,0	7,31	84,8	3,69	73,8	354,8	3
Khaya	15,61	100,0	10,77	87,1	8,62	100,0	5,00	100,0	387,1	1
<i>Abkürzungsverzeichnis</i>										
<i>d. S.: durchschnittliches Sustain</i>						<i>S. R.-P.: Summe ‚Ranking‘-Punkte</i>				
<i>R.-P.: ‚Ranking‘-Punkte</i>						<i>Pltz.: Platzierung</i>				

5.3.2 Sustain – Einfluss des Korpusholzes

In der eigens durchgeführten Studie „*Einfluss des Korpusholzes auf den Klang eines elektrisch verstärkten Zupfinstruments*“ (Herzberg 2021) wurden insgesamt acht verschiedene Korpushölzer auf ihre klangliche Einflussnahme untersucht. Die dort gesammelten Messdaten wurden nach der in Kapitel 4.2.3 erläuterten Methode aufgearbeitet, um folgend Aufschluss über den Einfluss des Korpusholzes auf das Sustain geben zu können.

Aus platztechnischen Gründen wurde in den Liniendiagrammen lediglich die Abkürzung des jeweiligen Korpusholzes angegeben. Die jeweilige Holzbezeichnung kann der Tabelle 10 entnommen werden.

Tabelle 10: Kurzzeichen der Holzarten (Herzberg 2021)

Holzart	Holz-Bez.	Holzart	Holz-Bez.
Nussbaum	NB	Birnbaum	BB
Esche	ES	Sapelli, Sapeli Mahagoni	MAS
Douglasie	DG	Eiche (allg.)	EI
Ahorn (Bergahorn)	AH	Kirschbaum	KB

Anders als bei der Auswertung der Halshölzer, wurden hier – aus Gründen der Übersichtlichkeit – einzelne Liniendiagramme erstellt, in denen der Einfluss der Korpushölzer auf das Sustain anhand der jeweils vermessenen Saite miteinander verglichen werden (Abbildungen 50 – 53). Wie eingangs im Kapitel 5.3 erläutert, spiegeln auch die hier angegebenen Durchschnittswerte des Sustains lediglich eine Tendenz wider.

Im Vergleich des durchschnittlichen Sustains anhand der g-Saite fällt vor allem die große Differenz von 2,61 s zwischen dem Ahorn und Kirschbaum auf (Abbildung 46). Bei der c'-Saite liegt hier die größte Differenz mit 1,66 s zwischen dem Ahorn und Nussbaum (Abbildung 47). Die geringsten Differenzen kann man dagegen im Vergleich der e'-Saite in Abbildung 48 ausmachen: hier liegt das Sustain der Eiche gerade mal 0,61 s über dem des Birnbaums. In Abbildung 49 fällt die Differenz dagegen schon wieder recht hoch aus, berücksichtigt man das ohnehin schon kurze Sustain der a'-Saite. Hier liegt der Mahagoni 1,21 s über der Esche.

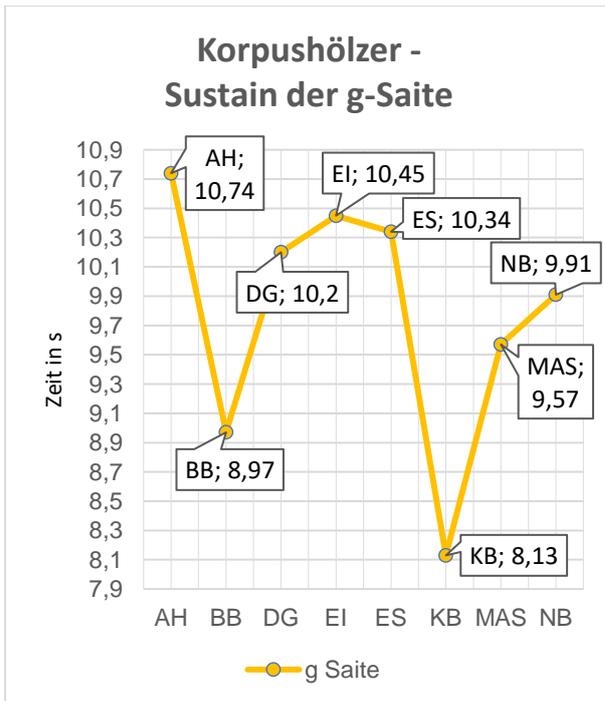


Abbildung 50: Korpushölzer - Sustain der g-Saite

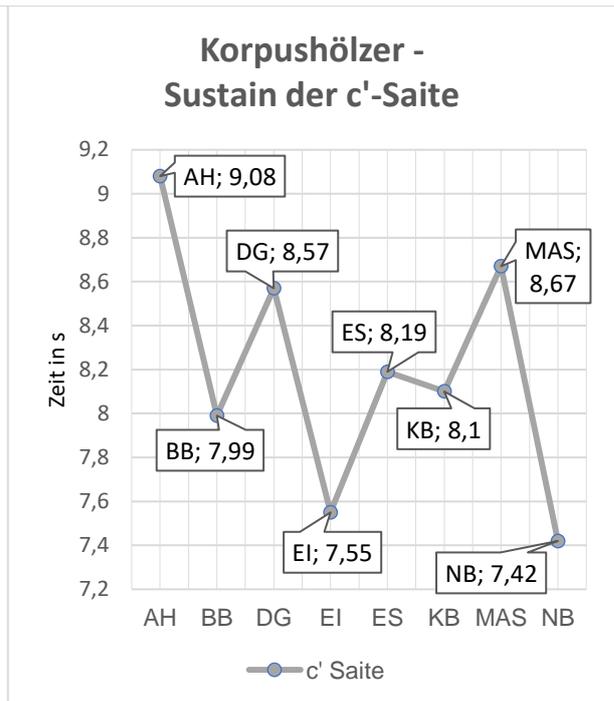


Abbildung 51: Korpushölzer - Sustain der c'-Saite

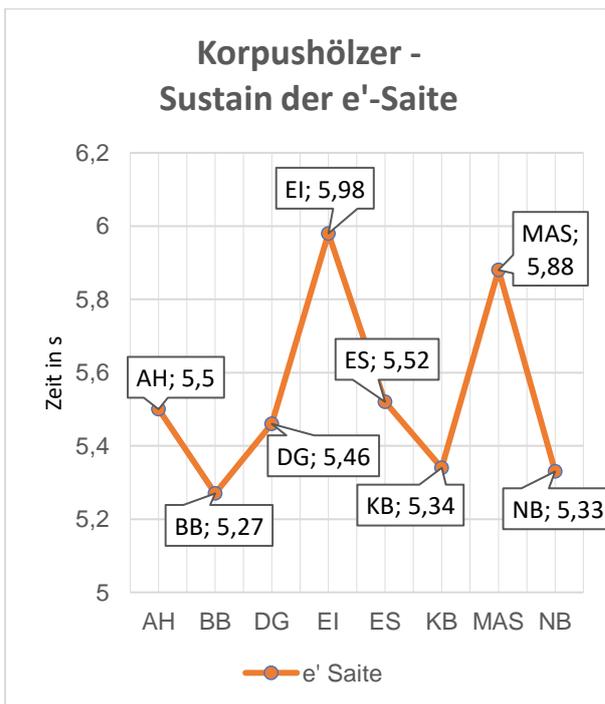


Abbildung 52: Korpushölzer - Sustain der e'-Saite

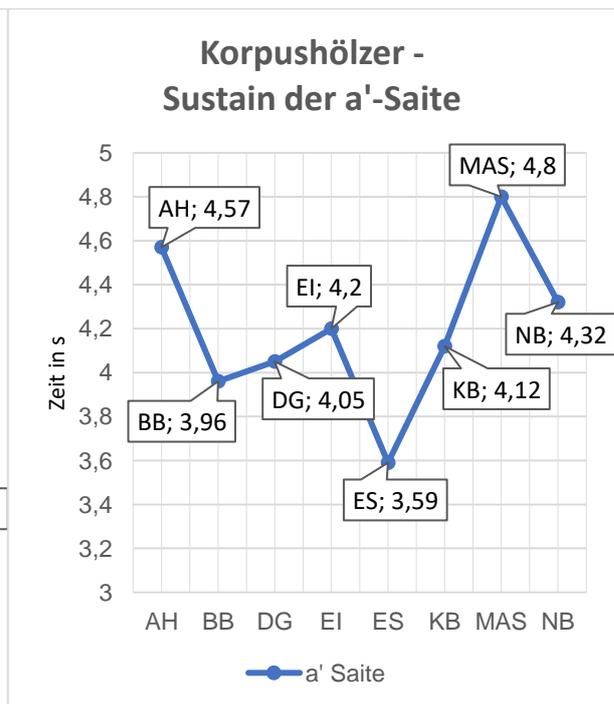


Abbildung 53: Korpushölzer - Sustain der a'-Saite

Zur Beurteilung, welches Korpusholz den größten Einfluss auf das Sustain hat, wurde auch hier ein ‚Ranking‘ erstellt (Tabelle 11). Hier zeichnen sich vor allem Ahorn (Platz 1) und Mahagoni (Platz 2) durch ein recht langes durchschnittliches Sustain der Saiten aus. Auf den unteren beiden Plätzen sind dagegen die einheimischen Obsthölzer Birn- und Kirschbaum.

Tabelle 11: ‚Ranking‘ Korpushölzer - durchschnittliches Sustain der Saiten (in s)

‚Ranking‘ Korpushölzer – durchschnittliches Sustain der Saiten (in s)										
	g-Saite		c‘-Saite		e‘-Saite		a‘-Saite		‚Ranking‘	
	<i>d. S.</i>	<i>R.-P.</i>	<i>d. S.</i>	<i>R.-P.</i>	<i>d. S.</i>	<i>R.-P.</i>	<i>d. S.</i>	<i>R.-P.</i>	<i>S. R.-P.</i>	<i>Pltz.</i>
Ahorn	10,74	100,0	9,08	100,0	5,5	92,0	4,57	95,2	387,2	1
Birnbaum	8,97	83,5	7,99	88,0	5,27	88,1	3,96	82,5	342,1	7
Douglasie	10,20	95,0	8,57	94,4	5,46	91,3	4,05	84,4	365,1	4
Eiche	10,45	97,3	7,55	83,1	5,98	100,0	4,20	87,5	367,9	3
Esche	10,34	96,3	8,19	90,2	5,52	92,3	3,59	74,8	353,6	5
Kirschbaum	8,13	75,7	8,10	89,2	5,34	89,3	4,12	85,8	340,0	8
Mahagoni	9,57	89,1	8,67	95,5	5,88	98,3	4,80	100,0	382,9	2
Nussbaum	9,91	92,3	7,42	81,7	5,33	89,1	4,32	90,0	353,1	6
<i>Abkürzungsverzeichnis</i>										
<i>d. S.: durchschnittliches Sustain</i>						<i>S. R.-P.: Summe ‚Ranking‘-Punkte</i>				
<i>R.-P.: ‚Ranking‘-Punkte</i>						<i>Pltz.: Platzierung</i>				

Es lässt sich festhalten, dass das Korpusholz einen Einfluss auf das Sustain der hier vermessenen Leersaiten hat. Die Differenzen der Messergebnisse spiegeln auf der einen Seite sicherlich den Einfluss des Holzes wider, auf der anderen Seite können aber auch maßliche Ungenauigkeiten in der Ausarbeitung der Halstasche jedes einzelnen Korpus das Ergebnis der Messungen beeinflussen (vgl. Zollner 2010, S. 602). In welchem Maße das hier der Fall ist, kann nicht nachvollzogen werden.

Im Vergleich der Messergebnisse der Korpushölzer mit denen der Halshölzer fällt auf, dass das Sustain dort tendenziell zeitlich länger ausfällt als es bei den Korpushölzern der Fall ist. Das kann folgende Gründe haben: Einerseits wurden die Audiosignale anhand der Korpushölzer nicht über einen mit dem PC verbundenen Gitarrenverstärker aufgenommen, sondern über eine direkte Verbindung mit dem PC, andererseits unterscheiden sich die Einstellungen der pegelgesteuerten Aufnahme in *Audacity* beider Studien (siehe Herzberg 2021). Auch die unterschiedlich ausgearbeiteten Hälse dürfen nicht vernachlässigt werden: Während der Hals in Kombination mit den vermessenen Korpusen komplett ausgearbeitet worden war, wurden die drei Testhälse weder profiliert noch bundiert. Auch nicht unerwähnt sollen hier die unterschiedlichen Saitensätze sein, die verwendet wurden.

Deshalb bleiben die Messergebnisse zwar untereinander vergleichbar, aber der Vergleich des Sustains zwischen Hals- und Korpushölzern hat keinerlei Aussagekraft.

6 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend bestätigen die Ergebnisse dieser Studie jene vorangegangener Forschungsarbeiten: das Halsholz hat einen sehr geringen, zu vernachlässigenden Einfluss auf den Klang einer elektrisch verstärkten Gitarre, oder in diesem Fall einer E-Ukulele. Das Sustain kann allerdings durch die Holz Auswahl – sowohl Hals- als auch Korpusholz – tendenziell beeinflusst werden.

Die eingangs ausgewerteten Messungen der Materialeigenschaften der einzelnen Halshölzer zeigen z. T. große Unterschiede und unterstreichen den individuellen Charakter der Hölzer. Betrachtet man die Anforderungen an den Hals in der Spielpraxis, kristallisieren sich vor allem zwei Materialkennwerte heraus: der E-Modul und die Rohdichte. Der Hals muss in der Praxis einerseits eine hohe Biegesteifigkeit aufweisen, um der Saitenzugkraft entgegen wirken zu können, auch wenn gerade im Bereich der Stahlsaitengitarren ein eingebauter Halsspannstab auf längere Sicht unvermeidlich und üblich ist, andererseits wirkt sich eine gewisse Nachgiebigkeit des Halses auf ein positives Spielgefühl aus. Diesbezügliche Kompromisse muss man wohl auch beim Gewicht des Halses machen. Ein schwerer (und zusätzlich steifer) Hals vermindert die Gefahr auftretender ‚Dead Spots‘, macht das Instrument allerdings kopflastig und damit auf Dauer anstrengend zu spielen. Ein guter Mittelweg liegt hier sicherlich zwischen den Extremen schwer und steif und leicht und flexibel. Neben der Tatsache, dass der Gitarrenbauer unter Beachtung oben genannter Anforderungen an den Hals ein langlebiges Instrument zu bauen weiß, sollte allerdings der persönliche Geschmack des Musikers nicht außer Acht gelassen werden, denn gerade haptische, optische, aber auch psychoakustische Faktoren sind wichtige Entscheidungskriterien.

Aber ob und inwieweit der Charakter des Holzes tatsächlich den Klang eines elektrisch verstärkten Instruments beeinflusst, zeigten erst die hier durchgeführten klanglichen Analysen: Bei gleichbleibendem Messaufbau wurden Audiosignale einzeln erregter Leersaiten in Kombination mit einem der drei Testhälse aufgenommen, nach einer Frequenzanalyse Frequenzspektren erstellt und der Verlauf der Grund- und Obertonamplituden in Liniendiagrammen vergleichend gegenübergestellt. Im Vergleich der Hölzer untereinander fallen z. T. kleinere Amplitudenabweichungen auf, die aber im Vergleich zur jeweils vermessenen Anzupfposition der Leersaite gering ausfallen. Noch größere Abweichungen lassen sich unter Einflussnahme des ‚Tone‘-Potentiometers erkennen. So lässt sich festhalten, dass der Ort der Saitenerregung einen sehr viel größeren Einfluss auf den Klang hat, als das Holz.

Untersuchungen dieser vorliegenden Studie zum Einfluss des Holzes auf das Sustain, lassen dagegen die Aussage zu, dass sowohl das Hals- als auch Korpusholz das Sustain der

vermessenen Leersaiten beeinflussen können. Hier wurden die bereits aufgenommenen Audiosignale hinsichtlich ihres Zeitsignals untersucht und vergleichend ausgewertet.

Trotz aussagekräftiger Ergebnisse soll nicht unerwähnt bleiben, dass man im Zuge des in dieser Studie gewählten Messaufbaus zwei Problemquellen intensiver hätte betrachten können: Zum einen (a) den möglichen Einfluss auf Klang und Sustain durch unterschiedlich ausgearbeitete Ober- bzw. Kopfsattelkerben der drei Testhälse, zum anderen (b) den möglichen Einfluss auf das Sustain durch Abweichungen der Halstaschen bei den vermessenen Korpusen.

Trotz ihres und in dieser Studie als nachteilig anzusehenden Einflusses auf Klang und Sustain, bieten diese beiden Problemquellen doch Anreize für weitere Studien, wobei die Saiten-Auflager an Hals und Korpus bereits ausführlich in Zollners Studie „*Physik der Elektrogitarre*“ (2010) behandelt wurden. Ausblick: Welchen konkreten Einfluss hat aber die Halsbefestigung und wirkt sich eine geschraubte oder verleimte Hals-Korpus-Verbindung positiv oder eher negativ auf den Klang oder das Sustain aus? Oder ist gar der durchgehende Hals das Maß aller Dinge? Solche und ähnliche Fragen lassen Raum für weitere interessante Forschungsarbeiten.

7 Literatur-/ Quellenverzeichnis

- Fleischer, H. 1995. *Modalanalyse und Schallfeldberechnung an Gitarren. Forschungsbericht 02/95*. Institut für Mechanik Fakultät für Luft- um Raumfahrttechnik Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
- Fleischer, H. und Zwicker, T. 1996. ‚*Dead Spots*‘. *Zum Schwingungsverhalten elektrischer Gitarren und Baßgitarren. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/96*. Institut für Mechanik Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
- Fleischer, H. 1997. *Admittanzmessungen an akustischen Gitarren. Forschungs- und Seminarberichte aus dem Gebiet Technische Mechanik und Flächentragwerke 1/97*. Technische Mechanik und Flächentragwerke der Fakultäten Bauingenieur- und Vermessungswesen/Luft- und Raumfahrttechnik Universität der Bundeswehr München
- Fleischer, H. 1998. *Schwingungen akustischer Gitarren. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/98*. Institut für Mechanik Fakultät für Luft- um Raumfahrttechnik Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
- Fleischer, H. 2001. Schwingungsuntersuchungen an elektrischen Gitarren. *Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 2/01*. Institut für Mechanik Fakultät für Luft- um Raumfahrttechnik Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
- Gesamtverband Deutscher Holzhandel e.V. (GD Holz). 2021. „Ahorn.“ Zugriff 18.05.2021. <https://www.holzvomfach.de/fachwissen-holz/holz-abc/ahorn/>
- Gesamtverband Deutscher Holzhandel e.V. (GD Holz). 2021. „Erlenhölzer.“ Zugriff 18.05.2021. <https://www.holzvomfach.de/fachwissen-holz/holz-abc/erlenholzer/>
- Gesamtverband Deutscher Holzhandel e.V. (GD Holz). 2021. „Khaya Mahagoni.“ Zugriff 18.05.2021. <https://www.holzvomfach.de/fachwissen-holz/holz-abc/khaya-mahagoni/>
- Herzberg, R. 2021. *Einfluss des Korpusholzes auf den Klang eines elektrisch verstärkten Zupfinstruments*. Studiengang Musikinstrumentenbau, Markneukirchen

- Meinel, E. 2014. *Lehrbrief Musikalische Akustik. Teil 2 Akustik der Zupf- und Streichinstrumente*. Studiengang Musikinstrumentenbau, Markneukirchen
- Saus, Wolfgang. 2000/2020. „Klangfarbe.“ Zugriff 27.1.2021. <https://www.oberton.org/obertongesang/die-obertonreihe/#klangfarbe>
- Voigt, J. 2007. *Klanguntersuchungen an Konzertgitarren: Korrelation zwischen physikalischen Signalmerkmalen und psychoakustischen Attributen*. Fakultät Technik und Informatik der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
- Ziegenhals, G. 2017. *Messtechnik*. Markneukirchen
- Ziegenhals, G. 2017. *Musikalische Akustik 1. Schall und Schallwahrnehmung*. Markneukirchen
- Zollner, M. 2010. *Physik der Elektrogitarre*. Hochschule Regensburg, Labor Elektroakustik Fakultät für Elektro- und Informationstechnik, Regensburg
- Zollner, M. 2012. *Physik der Elektrogitarre – viel Schall, und gelegentlich Rauch*. Hochschule Regensburg

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unterschiede der Auflager bei akustischen & elektrischen Gitarren (Fleischer 2001, S. 82)	3-4
Abbildung 2: Ahorn Testhals, Vorderansicht	4-11
Abbildung 3: Ahorn Testhals, Rückansicht.....	4-11
Abbildung 4: Erle Testhals, Vorderansicht	4-11
Abbildung 5: Erle Testhals, Rückansicht.....	4-11
Abbildung 6: Khaya Mahagoni Testhals, Vorderansicht	4-11
Abbildung 7: Khaya Mahagoni Testhals, Rückansicht.....	4-11
Abbildung 8: Nussbaum Testkorpus, Vorderansicht.....	4-12
Abbildung 9: ‚Bridge‘, E-Fachabdeckung & Halsplatte	4-12
Abbildung 10: Positionierung des Beschleunigungsaufnehmers & Impulshammers am Hals	4-14
Abbildung 11: Positionierung des Beschleunigungsaufnehmers & Impulshammers am Korpus	4-14
Abbildung 12: Ono Sokki - Ahorn-Hals 2 kHz.....	4-15
Abbildung 13: Ono Sokki - Ahorn-Hals spielfertig 5 kHz.....	4-15
Abbildung 14: ‚Screenshot‘ - Frequenzgang visualisiert mit Matlab.....	4-15
Abbildung 15: Aufnahme der Audiosignale über zwanzig Anzupfvorgänge	4-17
Abbildung 16: Frequenzanalyse mit Audacity	4-17
Abbildung 17: ‚Screenshot‘ - Frequenzspektrum visualisiert mit Matlab	4-18
Abbildung 18: Anzupfvorrichtung Ansicht 1	4-20
Abbildung 19: Anzupfvorrichtung Ansicht 2.....	4-20
Abbildung 20: Audacity: zeitliche Länge zwanzig aneinander gereihter Ausschwingvorgänge	4-21
Abbildung 21: Vergleich zweier Frequenzspektren an ein und derselben Saite, aus zwei Messreihen.....	4-24
Abbildung 22: Beispiel eines Liniendiagramms zur Mittelung der Pegelabweichungen dreier Messreihen.....	4-25
Abbildung 23: Vergleich: Schallgeschwindigkeit in m/s längs & quer zur Faser.....	5-26
Abbildung 24: Vergleich: Volumen in cm^3 & Masse in g	5-27
Abbildung 25: Vergleich: Rohdichte in g/cm^3	5-28
Abbildung 26: Vergleich: Elastizitätsmodul in GPa längs zur Faser.....	5-29
Abbildung 27: Vergleich: Elastizitätsmodul in GPa quer zur Faser	5-29
Abbildung 28: Vergleich: Akustische Konstante in $\text{m}^4\text{kg}^{-1}\text{s}^{-1}$ längs & quer zur Faser	5-30

Abbildung 29: Frequenzgänge aller Halshölzer.....	5-31
Abbildung 30: Frequenzgänge aller Hälse am spielfertigen Instrument.....	5-32
Abbildung 31: Frequenzspektrum g-Saite, Ahorn Testhals, Anzupfposition ‚Bridge‘.....	5-34
Abbildung 32: Frequenzspektrum g-Saite, Erle Testhals, Anzupfposition ‚Bridge‘.....	5-34
Abbildung 33: Frequenzspektrum g-Saite, Khaya Mahagoni Testhals, Anzupfposition ‚Bridge‘	5-34
Abbildung 34: Frequenzspektrum g-Saite, Ahorn Testhals, Anzupfposition Hals.....	5-35
Abbildung 35: Frequenzspektrum g-Saite, Ahorn Testhals, Anzupfposition ‚Bridge‘.....	5-35
Abbildung 36: Frequenzspektrum g-Saite, Ahorn Testhals, Anzupfposition ‚Bridge‘ & Einfluss ,Tone‘-Potentiometer.....	5-35
Abbildung 37: Liniendiagramm: g-Saite – Pegelabweichungen der Halshölzer und Anzupfpositionen.....	5-36
Abbildung 38: Liniendiagramm: e‘-Saite - Pegelabweichungen aller Halshölzer & Anzupfpositionen.....	5-37
Abbildung 39: Frequenzgang a‘-Saite, Ahorn Testhals, Anzupfposition ‚Bridge‘.....	5-38
Abbildung 40: Frequenzgang a‘-Saite, Erle Testhals, Anzupfposition ‚Bridge‘.....	5-38
Abbildung 41: Frequenzgang a‘-Saite, Khaya Mahagoni Testhals, Anzupfposition ‚Bridge‘...5- 38	
Abbildung 42: Frequenzgang a‘-Saite, Khaya Testhals, Anzupfposition Hals.....	5-39
Abbildung 43: Frequenzgang a‘-Saite, Khaya Testhals, Anzupfposition ‚Bridge‘.....	5-39
Abbildung 44: Frequenzgang a‘-Saite, Khaya Testhals, Anzupfposition ‚Bridge‘ & Einfluss ,Tone‘-Potentiometer.....	5-39
Abbildung 45: Liniendiagramm: a‘-Saite - Pegelabweichungen aller Halshölzer & Anzupfpositionen.....	5-40
Abbildung 46: Liniendiagramm: a‘-Saite - Pegelabweichungen Ahorn & Khaya an Hals & ,Bridge‘.....	5-40
Abbildung 47: Liniendiagramm: a‘-Saite - Pegelabweichungen aller Hölzer am Hals.....	5-41
Abbildung 48: Liniendiagramm: c‘-Saite - Pegelabweichungen aller Halshölzer & Anzupfpositionen.....	5-42
Abbildung 49: Durchschnittliches Sustain aller Leersaiten anhand der drei Testhälse.....	5-43
Abbildung 50: Korpushölzer - Sustain der g-Saite.....	5-46
Abbildung 51: Korpushölzer - Sustain der c‘-Saite.....	5-46
Abbildung 52: Korpushölzer - Sustain der e‘-Saite.....	5-46
Abbildung 53: Korpushölzer - Sustain der a‘-Saite.....	5-46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung Frequenzen (in Hz) und Pegel (in dB) der Messreihen 1 – 3 am Ahorn-Hals.....	4-19
Tabelle 2: Beispiel: durchschnittliches Sustain der a'-Saite.....	4-21
Tabelle 3: Beispiel – ‚Ranking‘-Erstellung	4-22
Tabelle 4: Materialkennwerte aus Lucchimeter-Messungen.....	5-26
Tabelle 5: Masse ausgearbeiteter Testhälse & der Halsrohlinge.....	5-27
Tabelle 6: E-Moduln längs & quer zur Faser von Haines (Meinel 2014, S. 57).....	5-29
Tabelle 7: Frequenzgänge der Halshölzer: Frequenzen (in Hz) der ersten drei Moden.....	5-31
Tabelle 8: Frequenzgänge aller Hälse am spielfertigen Instrument: Frequenz (in Hz) der ersten 7-8 Moden.....	5-32
Tabelle 9: ‚Ranking‘ Halshölzer - durchschnittliches Sustain der Saiten (in s).....	5-44
Tabelle 10: Kurzzeichen der Holzarten (Herzberg 2021).....	5-45
Tabelle 11: ‚Ranking‘ Korpushölzer - durchschnittliches Sustain der Saiten (in s).....	5-47

Selbständigkeitserklärung

Zur ‚Thesis‘ mit dem Thema: *Einfluss des Halsholzes auf Klang und Sustain eines elektrisch verstärkten Zupfinstruments*

Ich, Raphael Herzberg erkläre gegenüber der Fakultät Angewandte Kunst Schneeberg (AKS/WHZ), dass ich die/das vorliegende Bachelor-Arbeit/Projekt (‚Thesis‘) selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Die vorliegende Arbeit ist frei von Plagiaten. Alle Ausführungen, die wörtlich oder inhaltlich (sinngemäß) aus anderen Quellen entnommen sind, habe ich als solche eindeutig kenntlich gemacht und nachgewiesen.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form weder von mir noch von jemand anderen als Prüfungsleistung (d.h. weder an der AKS/WHZ noch andernorts) eingereicht und ist auch noch nicht veröffentlicht worden.

Ort, Datum

Unterschrift

8 Anhang

Ahorn

Der Ahorn ist vor allem in Europa, Nordamerika und Asien weit und artenreich verbreitet, wobei die wichtigsten europäischen Vertreter der Berg- und Spitzahorn sind. Das Kurzzeichen gemäß DIN EN 13556 lautet *ACPL* und die botanische Bezeichnung *ACER spp.* (*Sapindaceae*). Der Ahorn wird zudem häufig in der Praxis in die Gruppen *Hard maple* und *Soft maple* gemäß ihrer Darrdicht eingeteilt: $>0,61 \text{ gcm}^{-3}$ = Hard maple, $<0,56 \text{ gcm}^{-3}$ = Soft maple. Die Farbe des Ahorns reicht von hellgelb bis fast weiß und dunkelt mit der Zeit helbräunlich gelb (Hard maple) oder intensiv rötlich oder grau (Soft maple) nach. Das Erscheinungsbild des Holzes reicht von geraden, über geriegelten oder geflammt Fasern bis hin zu Vogelaugenahorn. Gerade wegen seines dekorativen Charakters und seiner geringen Dauerhaftigkeit, wird der Ahorn ausschließlich im Innenbereich eingesetzt. Ob für Furniere, Fußböden, Treppen oder Möbel oder gar für Musikinstrumente und Schnitz- und Drechselholz, der Ahorn findet vielfältige Einsatzbereiche (GD Holz 2021).

Erle

Die Gattung der Erle ist vor allem in den nördlichen gemäßigten Klimazonen der Erde verbreitet zu denen mehr als 30 Arten zählen, wobei die baumförmigen Arten in Struktur, Farbe sowie technischen Eigenschaften sehr ähnlich sind. Für den europäischen Markt ist die in Europa überwiegend verbreitete Schwarzerle (*A. glutinosa*) und Grauerle (*A. incana*) von Bedeutung. Das Kurzzeichen gemäß DIN EN 13556 für Erlenhölzer lautet *ALGL* und die botanische Bezeichnung *Alnus spp.*, Familie *Betulaceae*. Diese sind „gleichmäßig strukturierte Hölzer mit porenlos erscheinender Oberfläche und blass gelblich brauner bis rötlich-brauner Färbung“ (GD Holz, 2021).

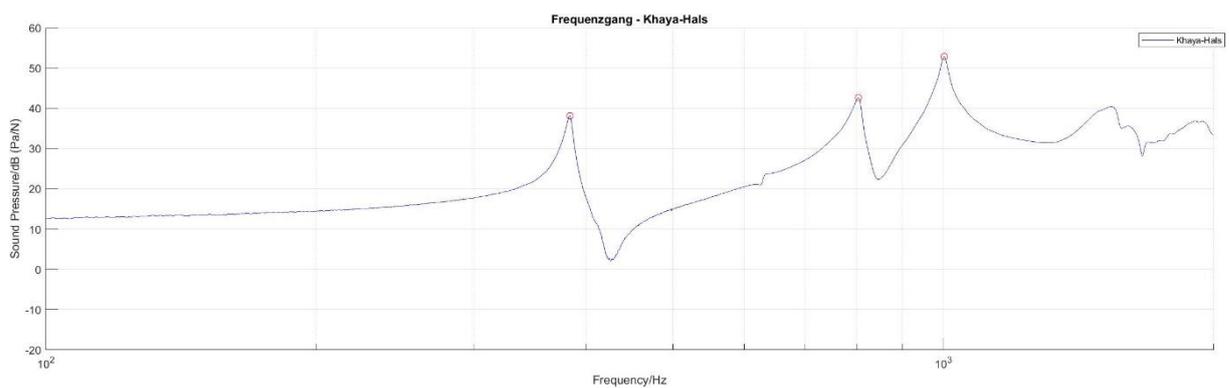
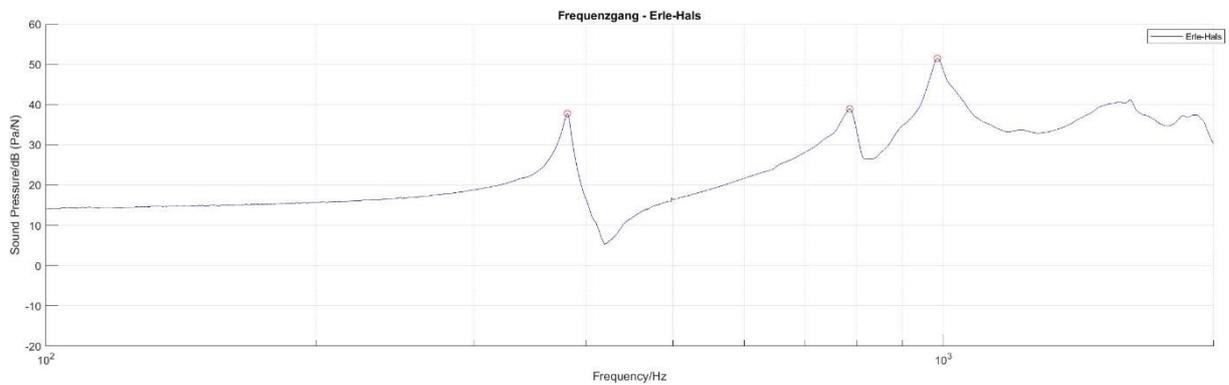
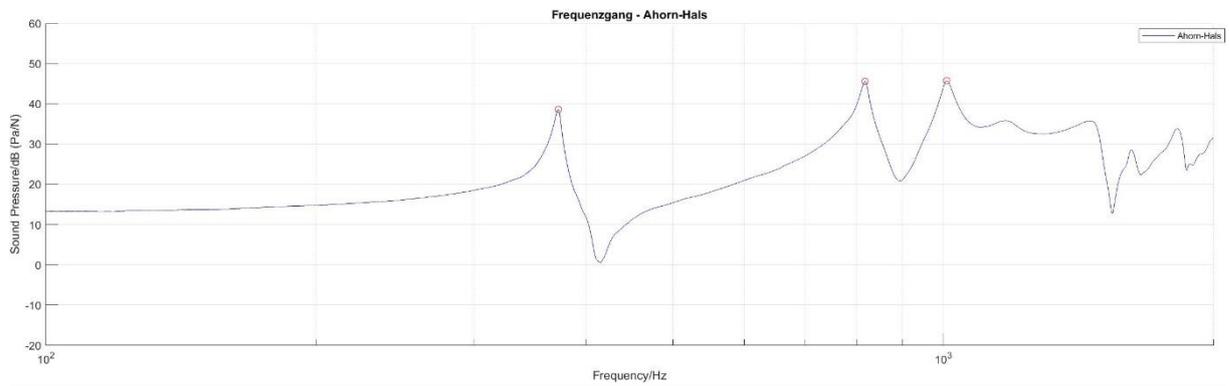
Khaya Mahagoni

Das Khaya Mahagoni kommt im tropischen Afrika, von Liberia bis Angola, vor und ist ein rotbraunes, meist schlichtes Holz, das in der Färbung und Dichte variieren kann. Das Kurzzeichen nach DIN EN 13556 lautet *KHXX* und die botanischen Bezeichnungen *K. anthoteca*, *K. grandifoliola*, *K. ivorensis*, *Khaya spp.* der Familie *Meliaceae*. Das Holz ähnelt im Aussehen und den Eigenschaften dem Amerikanischen Mahagoni und kann aufgrund der guten Verarbeitungseigenschaften, des guten Stehvermögens und der dekorativen Farbe sowohl im Außen- als auch im Innenbereich vielseitig eingesetzt werden (GD Holz, 2021).

Anhang

Anhang zu Kapitel 5.1.2: Zweipunktübertragungskurve

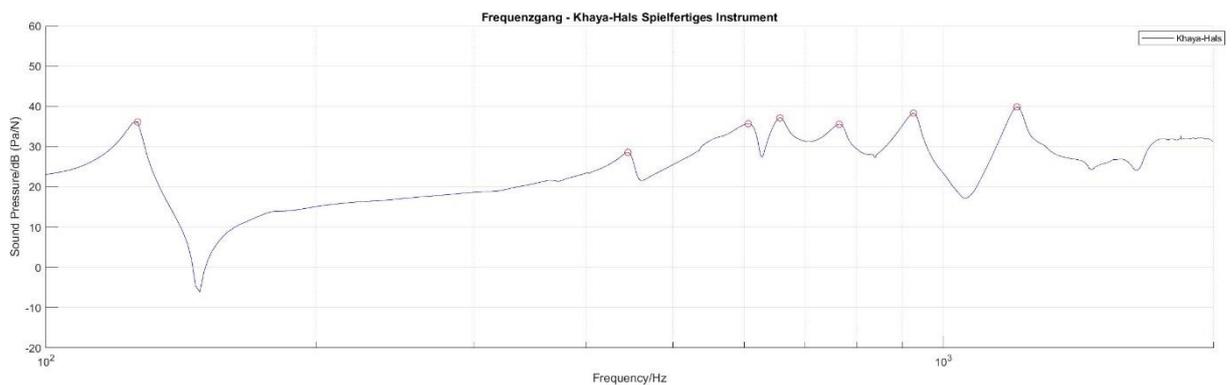
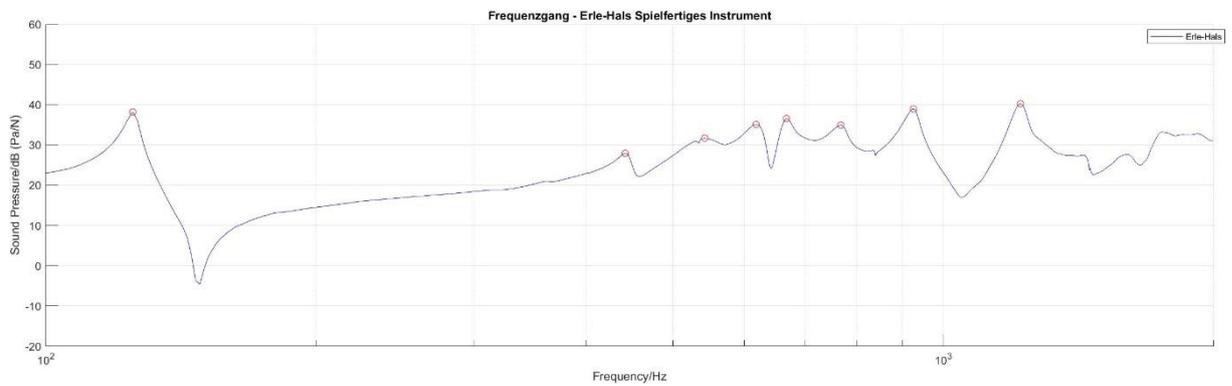
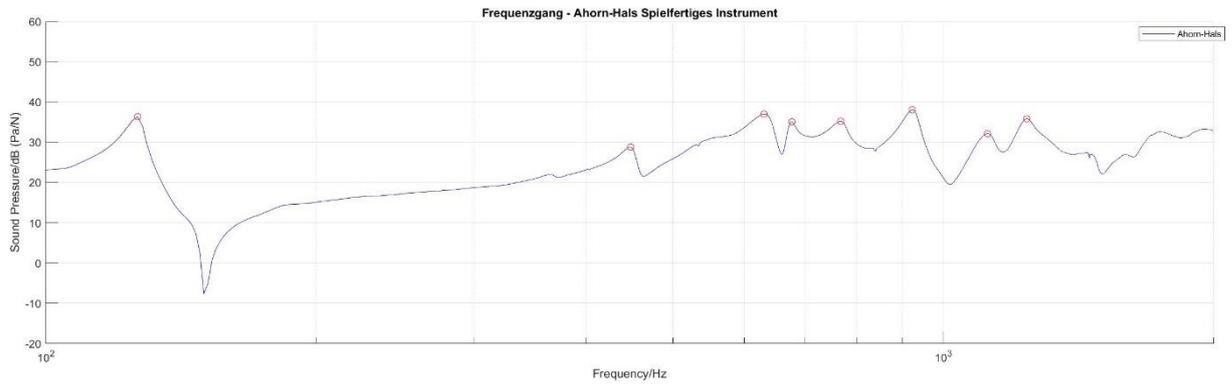
Zweipunktübertragungskurven der einzelnen Testhalse



	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Ahorn	373,125 Hz	818,75 Hz	1009,375 Hz
Erle	381,875 Hz	787,5 Hz	985,625 Hz
Mahagoni	384,375 Hz	805 Hz	1003,125 Hz

Anhang

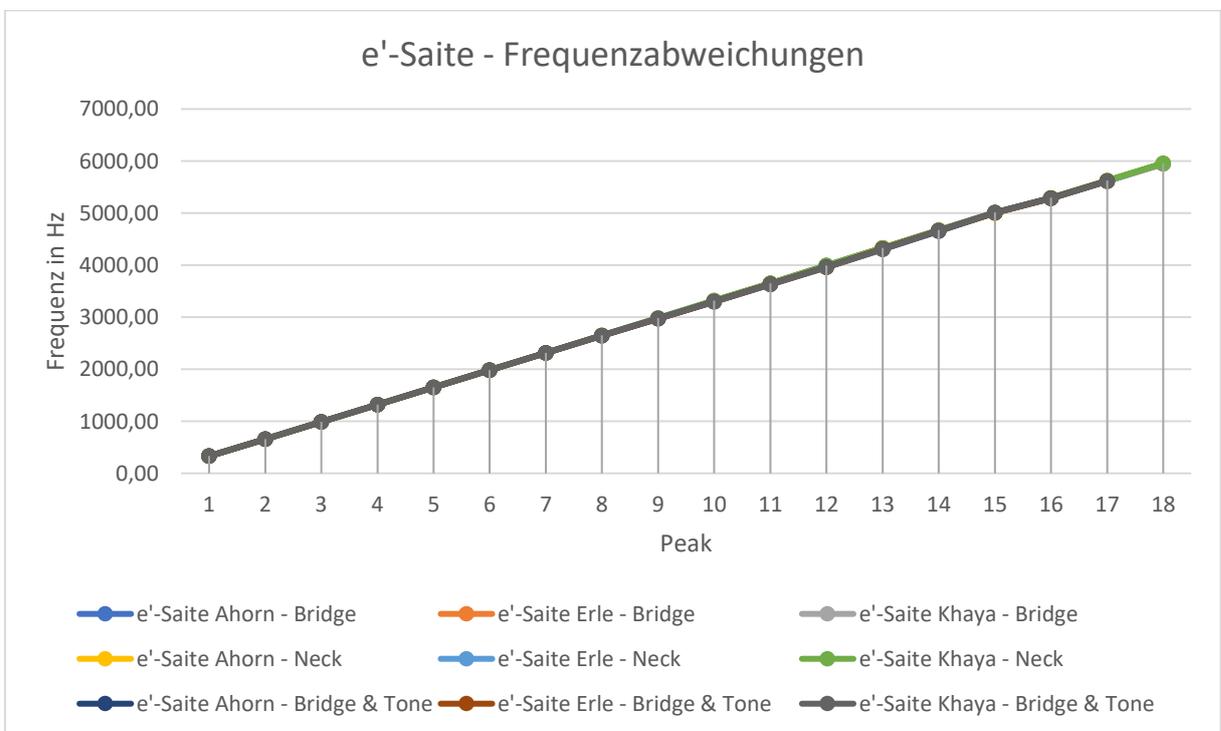
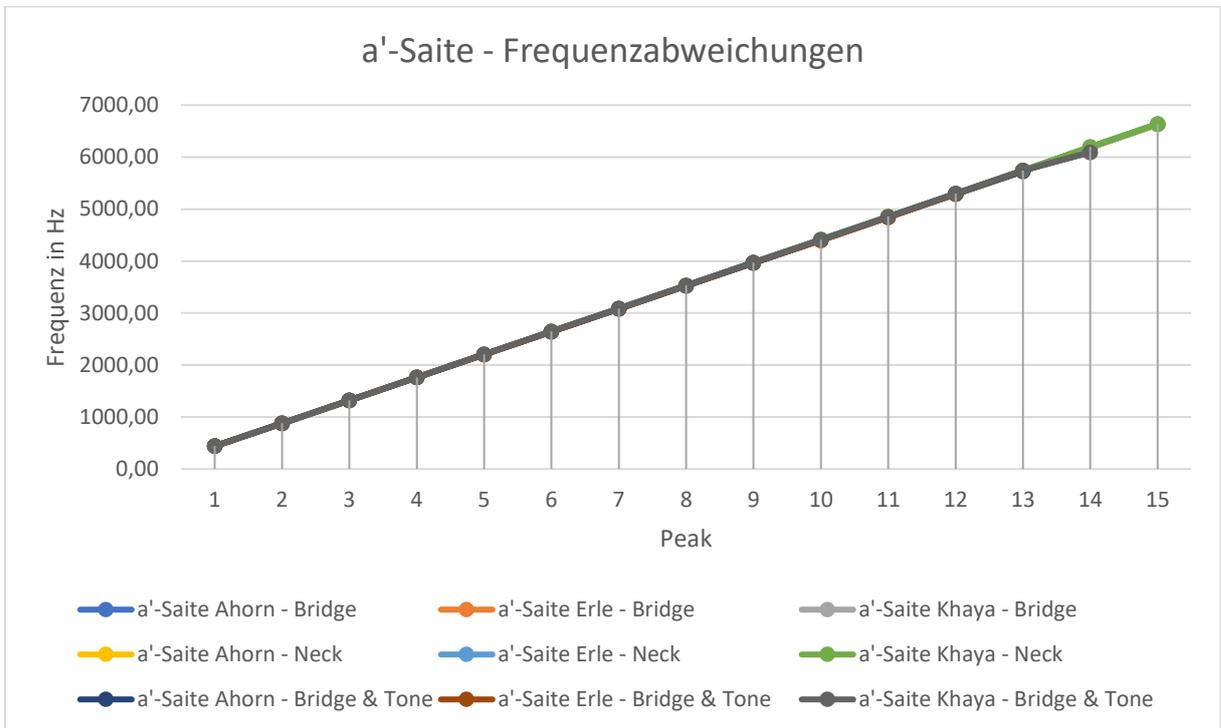
Zweipunktübertragungskurven der Testhalse im spielfertigen Zustand

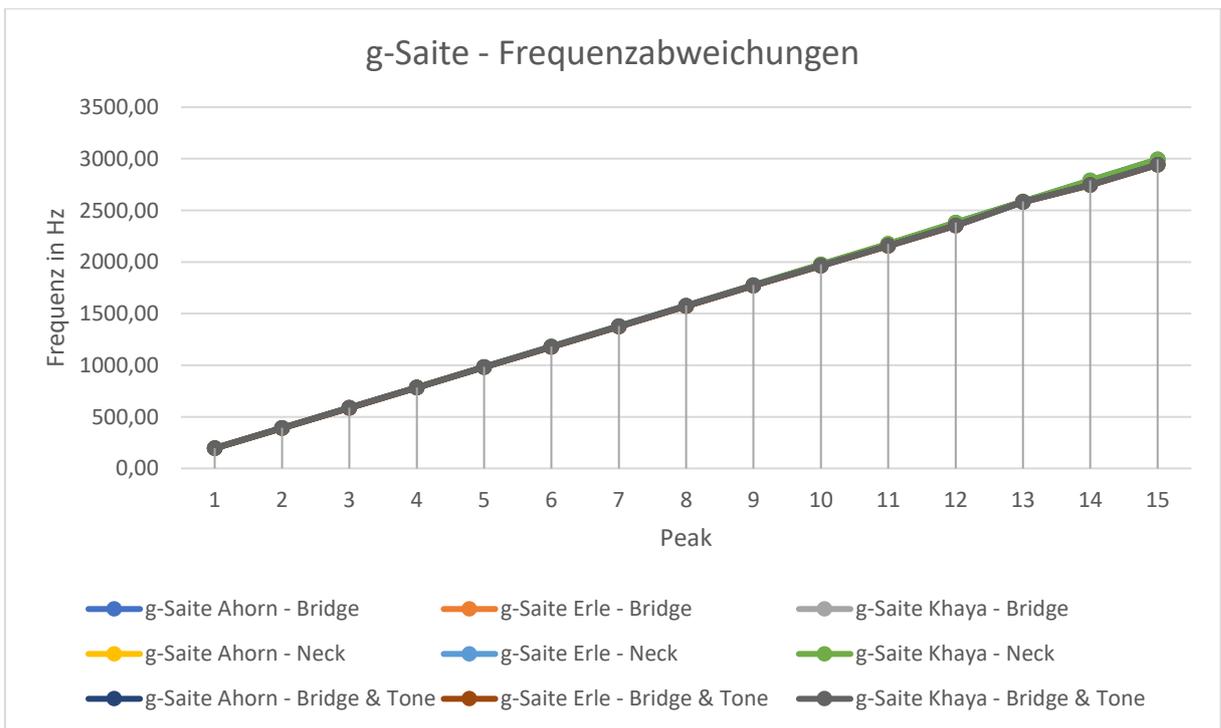
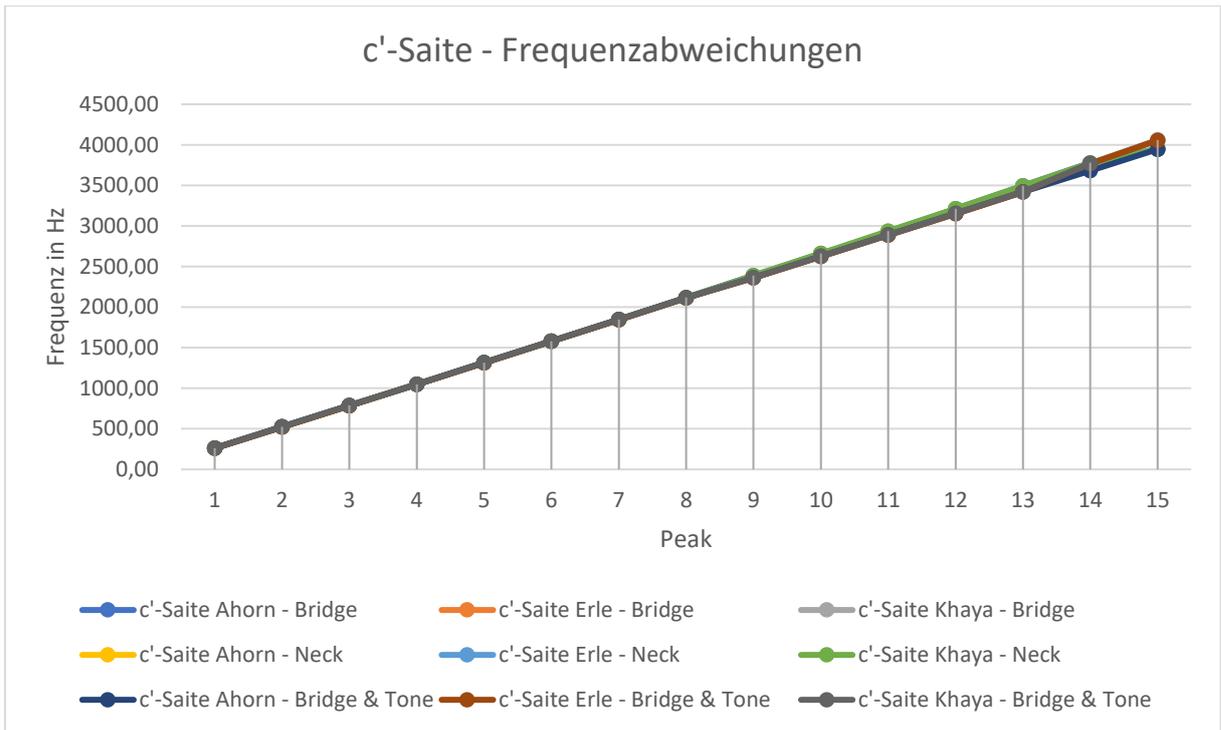


	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6	Mode 7	Mode 8
Ahorn	128,1	450	632,8	679,7	770,3	925	1121,9	1240,6
Erle	126,6	443,8	620,3	670,3	770,3	928,1		1220,3
Mahagoni	128,1	446,9	607,8	659,4	767,2	928,1		1209,4

Anhang zu Kapitel 5.2: Einfluss der Halshölzer auf den Klang

Frequenzabweichungen

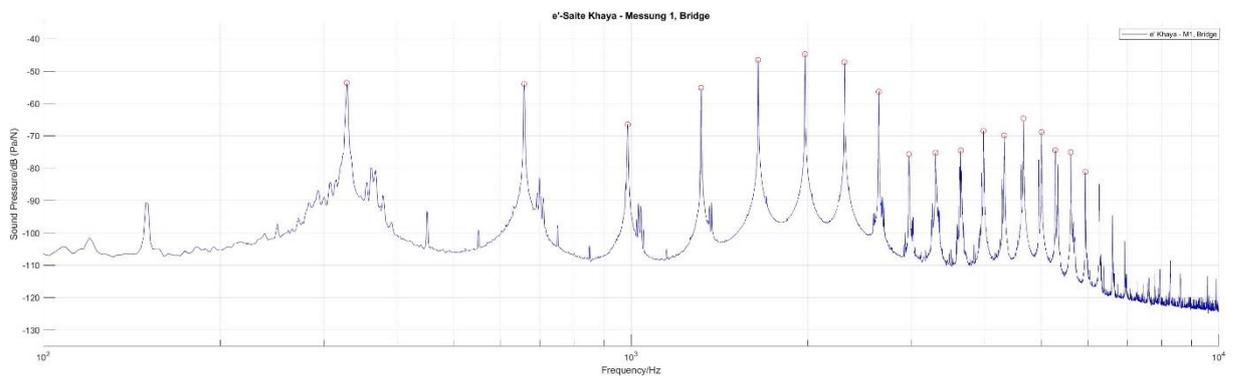
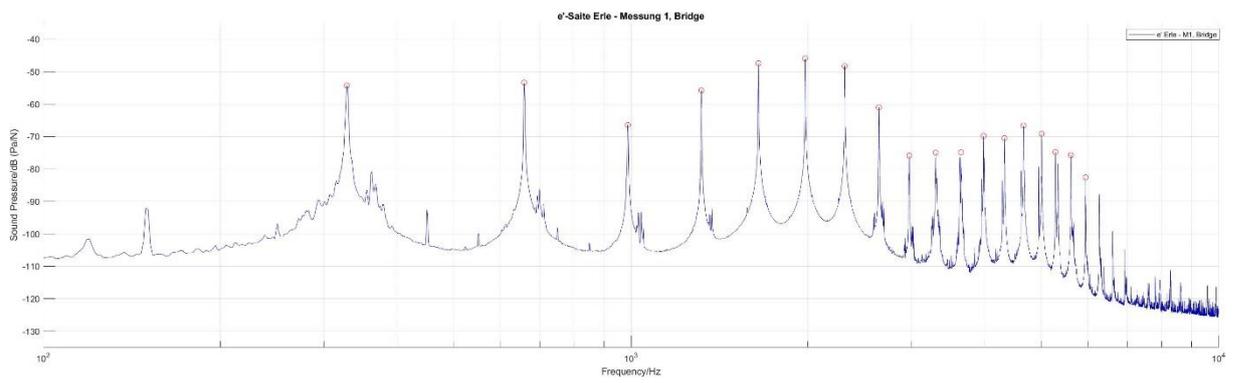
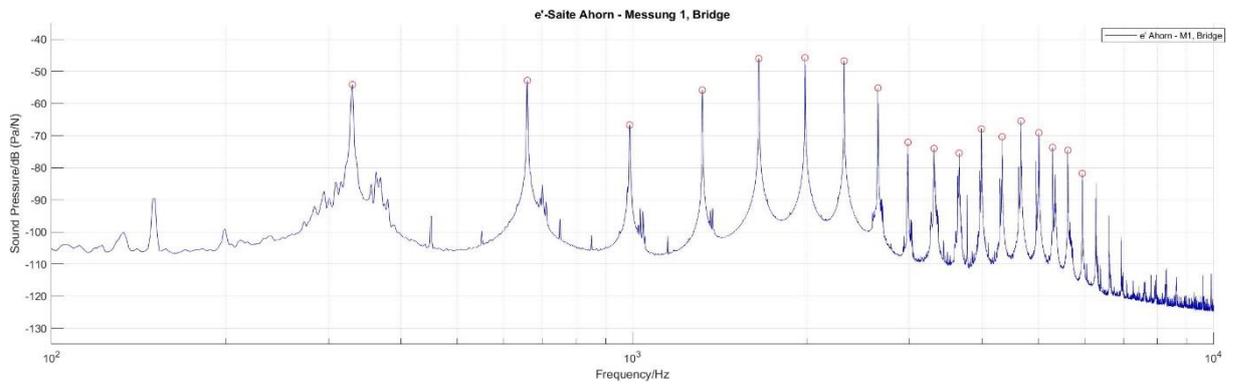




Anhang

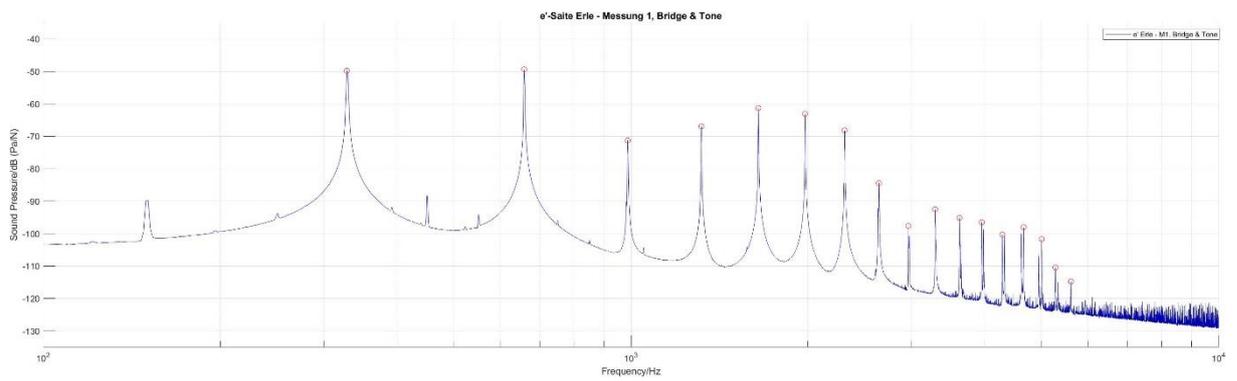
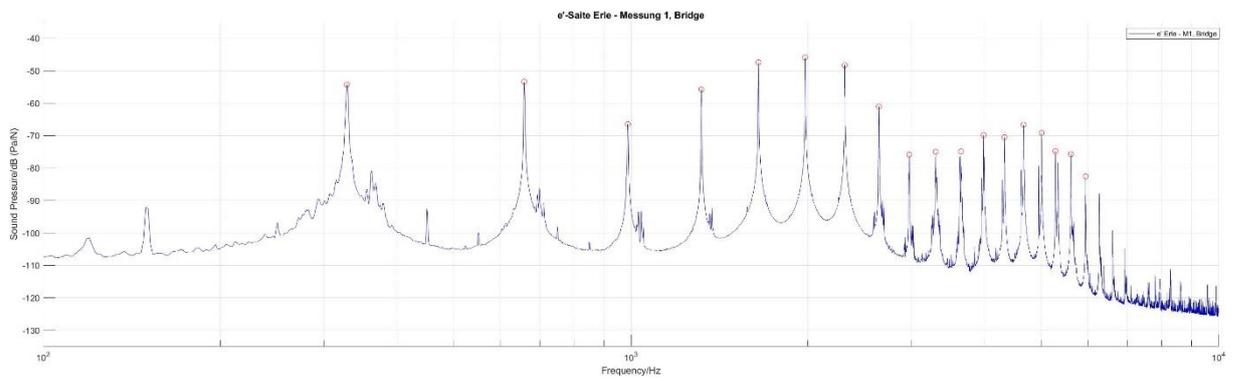
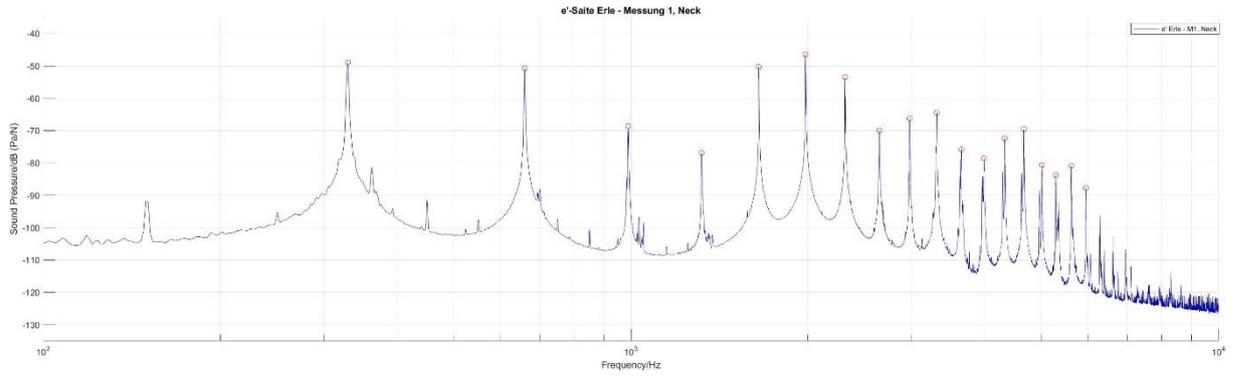
Anhang zu Kapitel 5.2.1: Auswertung der Frequenzspektren anhand der g- und e'-Saite

Frequenzspektren e'-Saite: Halshölzer im Vergleich



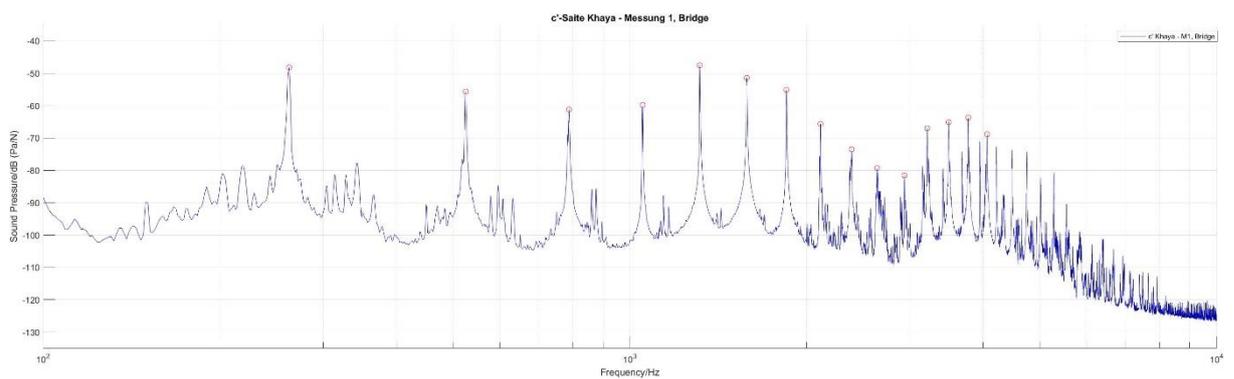
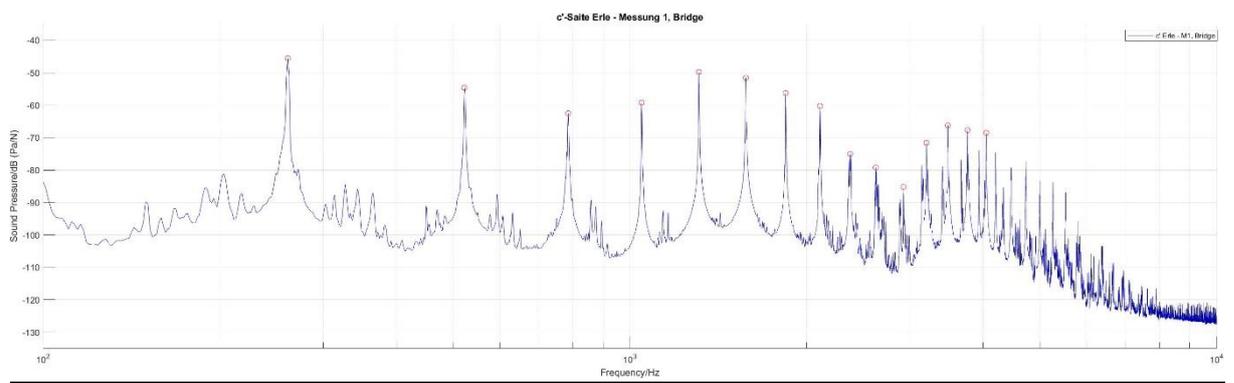
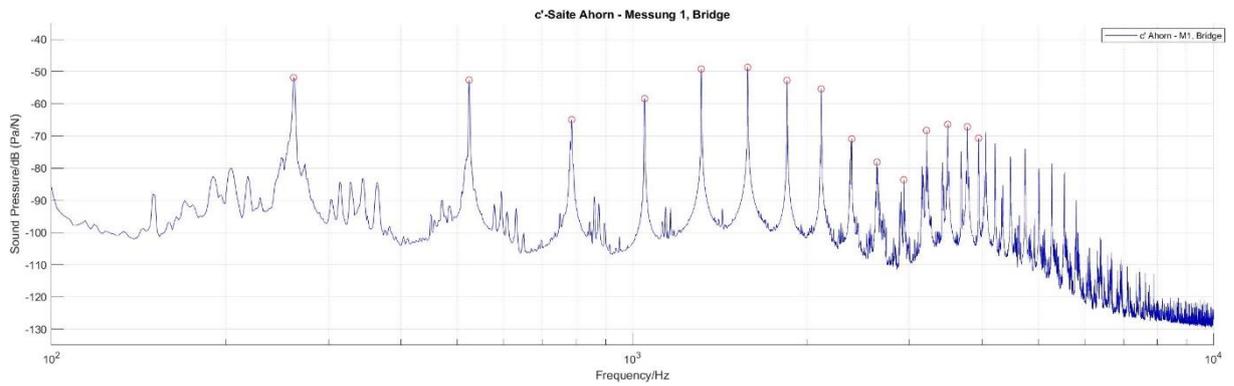
Anhang

Frequenzspektren e'-Saite: Anzupfpositionen und Einfluss des ‚Tone‘-Potentiometers im Vergleich



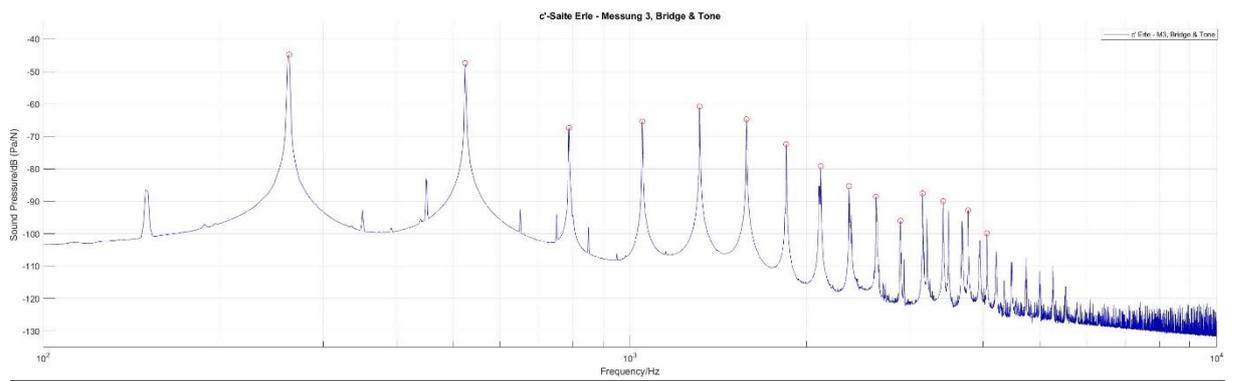
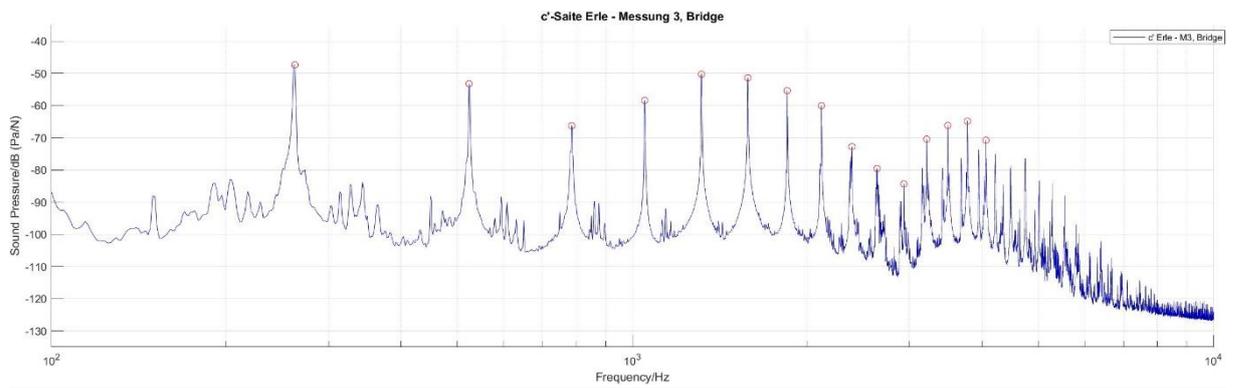
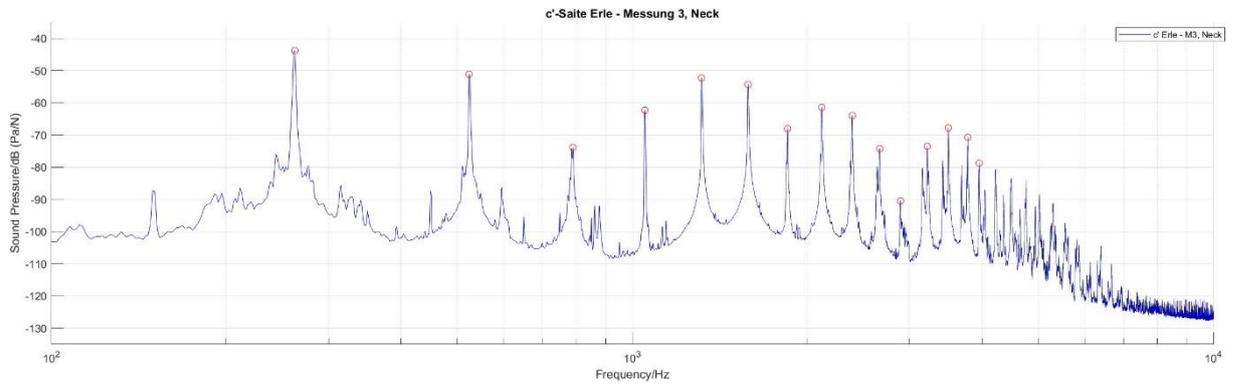
Anhang zu Kapitel 5.2.1: Auswertung der Frequenzspektren anhand der a'- und c'-Saite

Frequenzspektren c'-Saite: Halshölzer im Vergleich



Anhang

Frequenzspektren c'-Saite: Anzupfpositionen und Einfluss des ‚Tone‘-Potentiometers im Vergleich



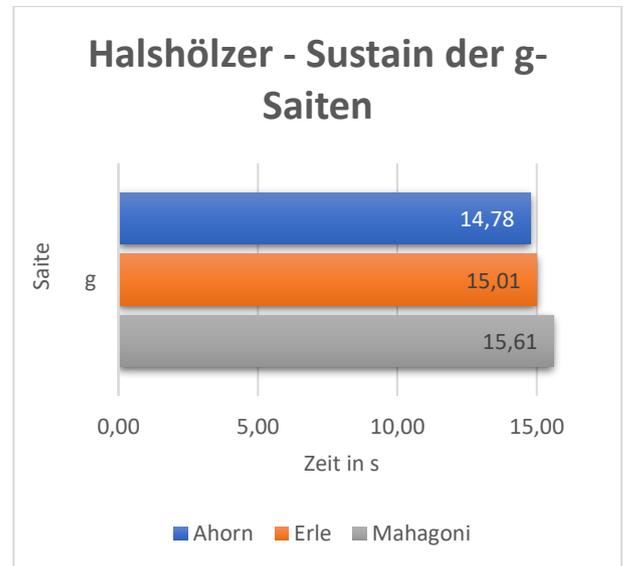
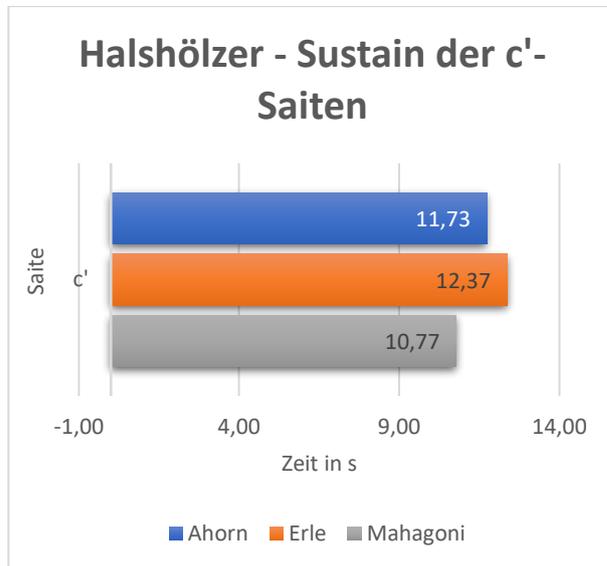
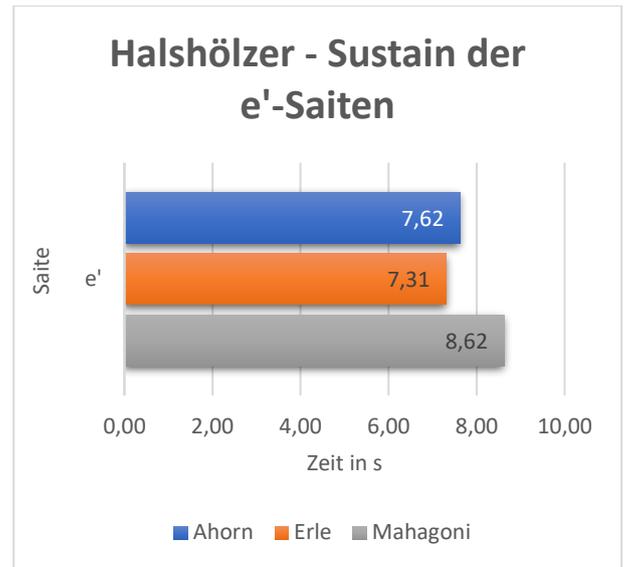
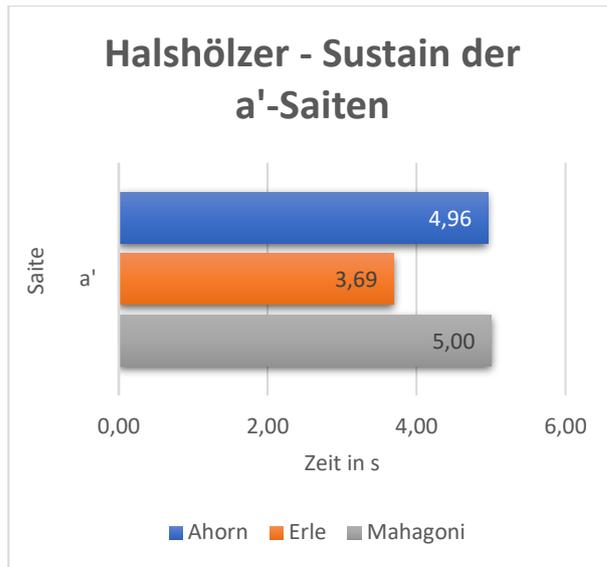
Anhang zu Kapitel 4.2.3 & 5.3.1: Sustain – Einfluss der Halshölzer

Khaya Mahagoni Testhals			
a'-Saite – Anzupfposition Hals			
Zeitl. Länge über zwanzig Ausschwingvorgänge (in s)			
<i>Messreihe 1</i>	<i>Messreihe 2</i>	<i>Messreihe 3</i>	<i>Summe der Messreihen 1 – 3</i>
101,08 s	98,79 s	100,28 s	300,15 s
Durchschn. Schwingungsdauer über sechzig Ausschwingvorgänge: 5,0025 s → 5,00 s			

Ahorn Testhals					
<i>Saite</i>	<i>Messreihe 1</i>	<i>Messreihe 2</i>	<i>Messreihe 3</i>	<i>Messreihensumme</i>	<i>Durchschn. Sustain</i>
a'	94,52 s	102,39 s	100,46 s	297,37 s	4,96 s
e'	133,04 s	162,02 s	162,44 s	457,50 s	7,62 s
c'	247,39 s	234,67 s	221,95 s	704,01 s	11,73 s
g	306,08 s	296,65 s	284,27 s	887,00 s	14,78 s

Erle Testhals					
<i>Saite</i>	<i>Messreihe 1</i>	<i>Messreihe 2</i>	<i>Messreihe 3</i>	<i>Messreihensumme</i>	<i>Durchschn. Sustain</i>
a'	69,28 s	74,55 s	77,77 s	221,6 s	3,69 s
e'	141,09 s	137,88 s	159,42 s	438,39 s	7,31 s
c'	249,06 s	239,30 s	253,58 s	741,94 s	12,37 s
g	310,63 s	284,30 s	305,50 s	900,43 s	15,01 s

Khaya Mahagoni Testhals					
<i>Saite</i>	<i>Messreihe 1</i>	<i>Messreihe 2</i>	<i>Messreihe 3</i>	<i>Messreihensumme</i>	<i>Durchschn. Sustain</i>
a'	101,08 s	98,79 s	100,28 s	300,15 s	5,00 s
e'	166,37 s	172,15 s	178,91 s	517,43 s	8,62 s
c'	194,02 s	190,74 s	261,60 s	646,36 s	10,77 s
g	326,44 s	297,43 s	312,59 s	936,46 s	15,61 s



Anhang zu Kapitel 5.3.2: Sustain – Einfluss des Korpusholzes

Durchschnittliches Sustain der Korpushölzer				
	<i>g-Saite</i>	<i>c'-Saite</i>	<i>e'-Saite</i>	<i>a'-Saite</i>
AH	10,74 s	9,08 s	5,50 s	4,57 s
BB	8,97 s	7,99 s	5,27 s	3,96 s
DG	10,20 s	8,57 s	5,46 s	4,05 s
EI	10,45 s	7,55 s	5,98 s	4,20 s
ES	10,34 s	8,19 s	5,52 s	3,59 s
KB	8,13 s	8,10 s	5,34 s	4,12 s
MAS	9,57 s	8,67 s	5,88 s	4,80 s
NB	9,91 s	7,42 s	5,33 s	4,32 s