



**Angewandte Kunst Schneeberg**  
Fakultät der Westsächsischen Hochschule Zwickau  
Studiengang Musikinstrumentenbau Markneukirchen

## **Bachelor-Thesis**

im Studiengang Musikinstrumentenbau  
Studienrichtung Streichinstrumentenbau

# **Klangbildung bei Streichinstrumenten – der menschlichen Stimme verwandt?**

Physikalisch-akustische Betrachtungen der klassischen Streichinstrumente  
im Vergleich mit der menschlichen Stimme

vorgelegt von: **Florian Zinkhahn**

Seminargruppe: 20 2005

Matrikelnummer: 38997

eingereicht am: 5. Juli 2021

## **Abstract**

Wie kommt man auf die Idee zu sagen der Klang von Streichinstrumenten sei der menschlichen Stimme verwandt – ihr ähnlich? Jeder Mensch wird doch den Klang einer gestrichenen Saite eines Streichinstrumentes von dem Klang eines gesungenen Tones unterscheiden können!

Diese Arbeit befasst sich grundlegend mit der Gegenüberstellung der Klangbildung bei Streichinstrumenten und der Funktionsweise der menschlichen Stimme. Durch die Entdeckung einiger Gemeinsamkeiten werden die Klänge beider unter Zuhilfenahme spezialisierter Software hinsichtlich ihrer Vokalqualität\* untersucht, um die Verwandtschaftsfrage objektiv analysieren zu können. Sind einem die Vokale als Mittel der Klangfarbenbeschreibung in der Kommunikation zwischen GeigenbauerIn und MusikerIn bekannt, so stellen vertiefte Kenntnisse über ihre „Resonanzursachen“ die Basis für eine sinnvolle Anwendung dar, insbesondere, wenn es um feine klangliche Nuancen geht. Im Allgemeinen konnte in der Arbeit nachvollzogen werden, dass Streichinstrumente durchaus formantähnliche Klänge erzeugen, sie also Vokalqualitäten enthalten können. Die Darstellung der Einzeltöne in einem Vokaldiagramm ließ erkennen, dass das Cello wohl die größte Bandbreite unterschiedlicher Klangfarben innerhalb des Vokaldreiecks bereithält, was u. a. seinem großen Tonumfang geschuldet ist.

\*MÜLLER und MORES DAGA 2008

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Literaturstudium .....</b>	<b>6</b>
2.1. Stand der Forschung .....	6
2.2. Klangbildung bei Streichinstrumenten .....	8
2.3. Funktionsweise der menschlichen Stimme .....	10
2.3.1. Anatomie und Physiologie .....	10
2.3.2. Vokaldreieck - Vokaltrapez .....	12
2.4. Gegenüberstellung Streichinstrumente – Stimme .....	14
<b>3. Planung und Durchführung akustischer Experimente .....</b>	<b>17</b>
3.1. Vokalformanten als Fokus der Untersuchungen .....	17
3.2. Wahl und Entwicklung der messtechnischen Methodik .....	18
3.3. Auslesen der Formanten der gesprochenen Vokale mit PRAAT .....	19
3.4. Tonleiteraufnahmen mit VoceVista Video Pro und Datenverarbeitung in Excel .....	20
3.5. Auslesen der Formanten .....	20
3.6. Vokalqualitätsprüfung durch Nachsingen einzelner Töne .....	24
<b>4. Ergebnisse und Diskussion der akustischen Untersuchungen .....</b>	<b>25</b>
4.1. Analyse der Tonleitern anhand des Vokaldiagramms .....	25
4.1.1. Tonleiter Geige .....	26
4.1.2. Tonleiter Bratsche .....	27
4.1.3. Tonleiter Cello .....	28
4.2. Analyse der nachgesungenen Töne .....	29
4.3. Analyse der Klangunterschiede Instrument – Stimme .....	30
4.4. Diskussion der Ergebnisse .....	30
<b>5. Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>32</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>35</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>37</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>37</b>
<b>Diagrammverzeichnis .....</b>	<b>38</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>.....</b>

## 1. Einleitung

Klarinette, Trompete, Flöte, Geige oder Cello, wem ist noch nie die Aussage begegnet, ein bestimmtes Instrument sei der menschlichen Stimme am nächsten? Möglicherweise wurde die ein oder andere Person jedoch noch nie mit dieser Frage konfrontiert, oder sie stellte sich ihr einfach nicht, da doch so große Unterschiede im Klang bestehen, dass von einer Ähnlichkeit überhaupt nicht gesprochen werden kann. Andersherum würde man wohl von vielen eine oder mehrere Antworten darauf bekommen, mit welchem Instrument am besten „gesungen“ werden könnte. Aussagen darüber, ein Instrument sei der menschlichen Stimme am nächsten, geben jedenfalls Grund zu der Annahme, dass gewisse Ähnlichkeiten in der Funktion vorhanden sein müssen, oder auch historische Beweggründe beim Bau der Instrumente dazu geführt haben könnten.

Die Klangbildung unterschiedlicher Instrumente allgemein weist zwar grundlegende Gemeinsamkeiten auf, dennoch gibt es, je nach Art, klare mechanisch-physikalische Unterschiede in der Tonerzeugung. So sind es bei Blasinstrumenten die Lippen des Spielenden, oder die Lippen in Kombination mit einem Rohrblatt, die als Tonerzeuger dienen und ein Rohr bzw. Schalltrichter, der durch die Erzeugung von stehenden Luftsäulen als Resonator funktioniert. Bei Zupf- und Streichinstrumenten dient die angeregte Saite als Tonerzeuger und der Korpus als Resonator. Wenn nun die menschliche Stimme – bei der die Stimmlippen als Tonerzeuger und der Vokaltrakt als Resonator funktioniert – mit der Tonerzeugung eines Instrumentes verglichen werden soll, würde man wohl auf den ersten Blick am ehesten den Vergleich mit einem Doppelrohrblattinstrument wählen, z. B. einer Oboe oder einem Fagott.

Nun gibt es jedoch auch Aussagen, Streichinstrumente wie die Geige oder das Cello kämen der menschlichen Stimme am nächsten. *"It's [the Cello] the instrument most like a human voice."* (ISSERLIS 2011)

Die Entwicklung der äußeren Form der klassischen Streichinstrumente der Violinfamilie, wie wir sie heute noch nachzubauen versuchen, fand vom 16. Jhd. bis ins 18. Jhd. in Norditalien statt. Eine enge historische Beziehung zwischen dem Klangideal von Streichinstrumenten und dem dortigen Aufkommen des Belcantos ist anzunehmen. Es wäre also denkbar, dass eine gewisse Intention der InstrumentenbauerInnen darin bestand, den Klang der Instrumente am Ideal der menschlichen Stimme zu orientieren. (vgl. HEIKE und DÜNNWALD 2003) Die Entwicklung eines Orgelregisters benannt als „Vox humana“ zeugt ebenfalls von dem Bestreben, die menschliche Stimme instrumental nachzuahmen. Doch was macht die menschliche Stimme überhaupt aus?

Sicherlich gibt es keine eindeutige Antwort auf die Verwandtschaftsfrage des Klangs von Streichinstrumenten mit der menschlichen Stimme. Möglicherweise kann jedoch das Verständnis über die Klangbildung der Stimme als hilfreiches Werkzeug zur Kommunikation zwischen GeigenbauerIn und MusikerIn verwendet werden. Schließlich kann jeder Mensch unterschiedliche Vokale erkennen.

Es soll in dieser Arbeit versucht werden, in der Literatur Antworten auf obige Fragen zu finden und durch das Betrachten der Klangbildung von Streichinstrumenten und der menschlichen Stimme ein besseres Verständnis darüber zu erlangen. Da die Themengebiete

Streichinstrumente und Stimme jedes für sich sehr weitläufig sind, muss sich diese Arbeit zwangsläufig auf wesentliche Aspekte beschränken.

Im Geigenbau stellt die Verknüpfung von Klangbeschreibungen mit Hilfe der Vokale eine bekannte Methodik dar. Aus Sicht des Autors scheint jedoch relativ selten von ihr Gebrauch gemacht zu werden. Klangbeschreibungen wie hell, dunkel, warm, scharf, brillant, klar, voluminös, nasal, offen, zu, gehören vielleicht eher zum gebräuchlichen Vokabular. Da sich Klangbeschreibungen in vielen Aspekten nur als subjektive Wahrnehmung vermitteln lassen, wäre es wünschenswert, ergänzend objektive Kriterien heranziehen zu können. Offensichtlich ist es ja bei den Vokalen eine Klangfarbenveränderung der Stimme, durch die wir sie zweifelsfrei erkennen. Es sind also „bekannte Größen“, die wir von klein auf vermittelt bekommen haben. Doch auch der Vergleich von Klängen mit Vokalen hat seine Herausforderungen. Eine Problematik, ist sicherlich, dass die Menschen nun einmal in ihrer Sprache oder ihrem Dialekt geprägt sind, sodass bspw. ein hochdeutsches /a zum vogtländischen /å wird. Erst in dem Bewusstsein über klangliche Nuancen der Vokale selbst, können diese womöglich als Schlüssel-„Vokalular“ (im Sinne eines Pendants zum Schlüsselvokabular) zur Beschreibung einer Klangfarbe eingesetzt werden.

Im Ersten Teil dieser Arbeit werden zunächst ausgewählte Inhalte der Literaturrecherche vorgestellt, die sich explizit vergleichend mit der menschlichen Stimme und Streichinstrumenten befassen. Anschließend werden die wesentlichen Elemente der Klangbildung und Funktionsweise der menschlichen Stimme und Streichinstrumente erläutert. Mit einer Gegenüberstellung von Stimme und Streichinstrumenten sollen mögliche Analogien festgehalten werden, um die titulierte Verwandtschaftsfrage möglicherweise zu klären.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschreibt die Planung und Durchführung akustischer Experimente. Ziel dieser Experimente war es Stimm- und Streichinstrumentenklänge messtechnisch zu erfassen und vergleichend zu analysieren. Dies erfolgte unter der Zuhilfenahme der Sprachanalysesoftware PRAAT<sup>1</sup> und des speziell zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen Klangphysik und Wahrnehmung von Musik entwickelten Programmes VoceVista Video Pro<sup>2</sup>.

Die Ergebnisse der Experimente sowie deren Diskussion stellt den dritten Teil dieser Arbeit dar; eine Zusammenfassung sowie Hinweise auf weiteres Forschungspotential bilden den Schluss.

---

<sup>1</sup> PRAAT, Version 6.1.41 (Copyright © 1992-2021 by Paul Boersma and David Weenik) ; [praat.org](http://praat.org)

<sup>2</sup> VoceVista Video Pro, Version 5.4.2.5435 (Entwickelt von Sygyt Software: Bodo Maass, Wolfgang Saus, Don Miller); [www.sygyt.com](http://www.sygyt.com)

## 2. Literaturstudium

### 2.1. Stand der Forschung

Auf der Suche nach Literatur, die in irgendeiner Weise einen Vergleich der menschlichen Stimme mit Musikinstrumenten vornimmt oder deren Zusammenhänge erläutert, sind einige interessante Quellen gefunden worden. Da es sich dabei zum Teil um sehr umfassende Arbeiten handelt, können im Folgenden nur einige wichtige Aspekte herausgegriffen werden. Der Fokus liegt hier im Wesentlichen auf dem physikalisch-akustischen Verständnis der Klangbildung von Streichinstrumenten und der menschlichen Stimme, wodurch psychoakustische, sowie historische, kulturelle oder soziologische Aspekte vernachlässigt werden.

JANNSON untersuchte 1966 die Ähnlichkeit von Streichinstrumenten und der menschlichen Stimme. Anhand des Source-Filter Modells von Fant (1960) zeigt JANNSON, dass die grundsätzliche mechanische Klangerzeugung unterschiedlich ist, sich die Klänge von Streichinstrumenten und der menschlichen Stimme jedoch durch die Ausbildung bestimmter Formantbereiche (erhöhte Pegel einzelner Bereiche im Frequenzspektrum eines Klanges) im unteren Frequenzbereich ähneln. Aufgrund der deutlich erhöhten Abstrahlung hoher Frequenzanteile bei der Geige kommt JANNSON durch Hörversuche zu dem Schluss „*There is no vowel which sounds like a violin.*“ (JANNSON 1966). In ähnlichen Untersuchungen ASKENFELT's (1991) mit der Überschrift „*Voices and strings: Close cousins or not?*“ wird den beiden Gattungen zumindest eine formale Verwandtschaft zugestanden: „[...] *there are indeed some striking similarities in the output from the two instruments which justifies a formal cousin-ship.*“ Diese Ähnlichkeit sieht er in der Möglichkeit den Obertongehalt des Klanges zu formen. Im Instrumentalspiel wird dies durch die Kontaktstelle des Bogens an der Saite, den Bogendruck und die Bogengeschwindigkeit realisiert, im Gesang durch die Kontrolle der Stimm Lippen und der Menge des Luftstromes.

Untersuchungen zur Beziehung des Geigenklangs zum Gesang von HEIKE und DÜNNWALD (2003) versuchen die Hüllkurve des an sich sehr zerklüfteten Frequenzspektrums der Geige unter dem Aspekt der phonetischen Formantkonzeption auf adaptierte Weise zu verstehen. So wie bei der Sprache bestimmte Formantbereiche den jeweiligen Vokal prägen, weist DÜNNWALD (1990) den sich durch die geglättete Hüllkurve des Frequenzspektrums einer Geige abzeichnenden Formantbereichen subjektiv empfundene Klangattribute zu. Er erkennt eine Parallelität zwischen Gesangstimme und Geige, die beide um 3000 Hz eine ausgeprägte Resonanz aufweisen, vorausgesetzt es handelt sich um eine ausgebildete Gesangsstimme und ein hochwertiges Instrument.. Die Verstärkung in diesem Bereich wird allgemein als „Sängerformant“ bezeichnet und sorgt für eine gute Tragfähigkeit im Klang.

Um über den Klang von Geigen allgemeingültige Aussagen bezüglich der Klangfarbe treffen zu können, verglichen MÜLLER und MORES (2008) einzelne auf der Geige gespielte Töne mit Gesangsaufnahmen, die dem entsprechenden Geigenton nachgesungenen wurden. Hier wurde eine Methodik eingeführt, bei der versucht wird, die Vokalqualität aus Instrumentenklängen zu extrahieren. Dies geschah mit Hilfe von Sprachanalysesoftware, die durch ein automatisiertes Verfahren in der Lage ist, die vokalbildenden Haupt-Formantbereiche

eines Klanges zu ermitteln. Da die spezifische Lage der Vokalformanten bei Sprache von Mensch zu Mensch sehr unterschiedlich ausfällt, wurden die Daten anhand eines Vokaldiagramms (Kapitel 2) ausgewertet, welches auf empirisch gewonnenen Mittelwerten basiert. Der Anspruch dieser Vorgehensweise ist nicht das Erfassen einer kompletten, differenzierten Klangfarbenbeschreibung. Da die Lage einiger Geigentöne und der gesungenen Töne sich im Vokaldiagramm an sehr ähnlichen Positionen befinden, spricht diese Methode für einen gemeinsamen Nenner bei der Beurteilung eines wahrgenommenen Klanges. Die Vokalqualität von Geigenklängen kann jedoch nicht durchgehend festgestellt werden. Schon allein die hohe Frequenzlage der Geigentöne erlaubt es nicht, die für Vokale relevanten Frequenzbereiche abzustrahlen. Weitere Untersuchungen dieser Art weisen auch auf die Grenzen dieses Ansatzes hin (MORES 2015). Dennoch bleibt er sehr interessant, da er zumindest eine objektive Basis zur Klangwahrnehmung für immerhin eine Komponente des Gesamtklangles bildet. Ähnliche Untersuchungen wurden auch von einer Gruppe um TAI et al. (2018) durchgeführt, in denen u.a. festgestellt wurde, dass unterschiedliche Geigen des selben Erbauers ähnliche Vokalqualitäten aufweisen.

Auf der Suche nach Erklärungen, was Musikinstrumente stimmhaft oder stimmähnlich erscheinen lässt, haben SCHUBERT und WOLF (2016) neben dem physikalischen noch zwei weitere wichtige Aspekte herausgearbeitet: einen psychologischen und einen der die Ausdrucksmöglichkeit der Instrumente untersucht. Sie stellen die These auf, kein Instrument sei an sich „voice-like“, dennoch würden Musikinstrumente Eigenschaften mit der menschlichen Stimme teilen. So können Emotionen z.B. wie im Falle der Sprache mit Worten, bei Musikinstrumenten mit Klängen vermittelt werden. Diese Thesen werden in einer späteren empirischen Untersuchung durch eine Befragung von 174 Personen gestärkt (SCHUBERT 2019). Das Ergebnis der Befragung zeigt, dass nicht ein bestimmtes Musikinstrument am stimmähnlichsten bewertet wird. Statistisch betrachtet, auch wenn nur geringfügig mehr, werden die Klarinette, Oboe, Geige und das Cello als am stimmähnlichsten gewichtet. Es zeigte sich auch, dass Personen jenes Instrument am stimmähnlichsten empfinden, welches sie selbst spielen oder sie persönlich sehr schätzen. Instrumente bei denen mehrere Töne gleichzeitig erklingen können, wie z.B. beim Klavier, wurden weniger stimmähnlich empfunden als z.B. die Klarinette. SCHUBERT und WOLF kommen zu dem Schluss, dass, wenn gesagt wird ein Instrument sei besonders stimmähnlich, dies eher für die guten Ausdrucksmöglichkeiten des Instrumentes und der MusikerInnen stehe.

Ohne nun die Ausdrucksmöglichkeiten einzelner Instrumentengruppen zu werten oder zu vergleichen, soll in den nächsten Kapiteln gezielt die Klangbildung von Streichinstrumenten und die Funktionsweise der menschlichen Stimme im Detail betrachtet werden. Eine direkte Gegenüberstellung beider schließt den Teil der theoretischen Vorarbeit ab und stellt die Basis für die daraufhin vorgenommenen physikalisch-akustischen Untersuchungen dar.

## 2.2. Klangbildung bei Streichinstrumenten

Eine präzise Beschreibung des Konstruktes Streichinstrument soll hier nicht erfolgen, sondern lediglich auf grundsätzliche Merkmale eingegangen werden, die vor allem im Hinblick auf den Vergleich mit dem „Instrument“ menschliche Stimme relevant sein könnten.

Durch das Streichen des Bogens über die Saite wird bei Streichinstrumenten eine harmonische Schwingung einer bestimmten Frequenz generiert. Diese Schwingung der Saite, welche schlechte Abstrahlungseigenschaften hat, wird über den Steg auf den Korpus übertragen, der wiederum gute Abstrahlungseigenschaften besitzt. (vgl. ZIEGENHALS, VOIGTSBERGER 1996) Das spezifische Resonanzverhalten des Korpus sorgt dafür, dass bestimmte Frequenzbereiche stärker und andere schwächer abgestrahlt werden. Ihm kommt somit auch eine Filterwirkung zu.

Offensichtlich ist hier die durch den Bogen erzeugte Saitenschwingung der Generator, während der Steg und der Instrumentenkörper als Filter und Resonator wirken. Daher soll zunächst einmal die Tonerzeugung des Bogens auf der Saite und dann die Resonanz- und Filterwirkung des Korpus etwas genauer betrachtet werden.

Die Beschaffenheit der Saite ist sehr wichtig für die Klangbildung. Zum einen wird durch ihre Länge, ihre Dichte und die Saitenspannung die Grundfrequenz beeinflusst, zum anderen werden durch die Verwendung unterschiedlicher Materialien und Herstellungsverfahren ihre Biegesteifigkeit verändert, was sich auf die Ansprache und das spezifische Spektrum der Saite auswirkt (vgl. MEINEL 2014)

Je nach Anstrichart des Bogens, abhängig von Anstrichort, Bogengeschwindigkeit und Bogenruck wird die Saite auf unterschiedliche Art in Schwingung versetzt und somit die Wellenform des „Generatorsignals“ bestimmt (Abb. 1). Grundsätzlich besteht ein Schwingungszyklus an der Kontaktstelle des Bogens auf der Saite betrachtet aus einer Haft- und einer Gleitphase (vgl. ASKENFELD 1991). Während der Haftphase überwiegt die Reibungskraft zwischen Saite und Bogenhaar, die nur mit Hilfe der „Klebkraft“ des Kolophoniums ausgebildet werden kann. Das Einsetzen der Gleitphase beginnt in dem Moment, in dem die Rückschnellkraft der Saite die Reibungskraft des Bogens überwiegt. Eine zusätzlich entstehende Torsionsbewegung der Saite spielt dabei eine entscheidende, aber noch nicht vollends geklärte Rolle (MORES 2019). Da sich die übliche Bogenkontaktstelle bei ca. maximal 1/6 der schwingenden Saitenlänge vom Steg aus entfernt befindet, bedeutet

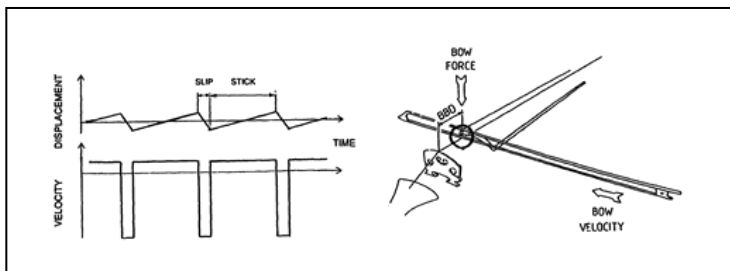


Abb.1: Durch den Bogen generierte Sägezahnschwingung (stick-slip-Phasen) und daraus resultierende Geschwindigkeitsänderung in Abhängigkeit der Position des Bogens auf der Saite ASKENFELD (1991)

dies, dass die Saitenschnelle, am Kontaktpunkt des Bogens betrachtet, während der Gleitphase deutlich größer ist als während der Haftphase. Bei einer Kontaktstelle von z.B. 1/6 der schwingenden Saitenlänge besteht die Gleitphase also aus 1/6 eines Schwingungszyklus, 5/6 entfallen auf die



Haftphase. Die Saitenschnelle während der Gleitphase ist somit fünf Mal größer (ASKENFELT 1991).

Während dieses Phasenverhältnis für die Ausbildung bzw. „Nichtausbildung“ höherer Teiltöne verantwortlich ist, spielt die Bogengeschwindigkeit und der Bogendruck eine wichtige Rolle für die Ausprägung der Amplitude des gesamten Spektrums. Ist die Gleitphase kürzer, so werden höhere Teiltöne stärker angeregt, ist sie länger, eher die Tiefen. Während bei erhöhter Bogengeschwindigkeit die Amplitude aller Teiltöne steigt, steigt bei erhöhtem Bogendruck nur die Intensität der Obertöne und nicht die des Grundtones. Um beim

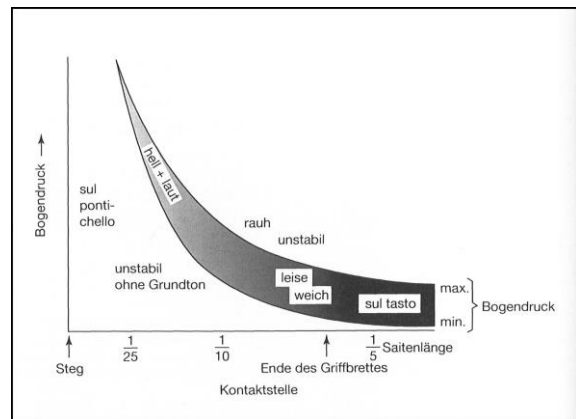


Abb. 2: Abhängigkeit des Bogendrucks von der Kontaktstelle bei konstanter Bogengeschwindigkeit (vgl. MEYER 2015)

Geige spielen mit dem Bogen einen stabilen Klang zu erzeugen, bei dem die Saite nicht erdrückt wird, bedarf es einiger Übung. Die Zusammenhänge dafür werden von MEYER in einem Diagramm veranschaulicht, wobei die schattierte Fläche den eigentlichen Spielbereich mit seinen dynamischen Ausdrucksmöglichkeiten darstellt (Abb. 2). (vgl. MEYER 2015, S.75 ff.)

Die von dem Bogen angeregte Schwingung der Saite wird nun über den Steg auf den Korpus übertragen. Dem Steg kommt bei der Impulsübertragung eine besondere Bedeutung zu, vor allem was die Übertragung der Frequenzen oberhalb seiner ersten Haupteigenfrequenz betrifft. (vgl. ZINKHAHN 2021). Hier entsteht eine Filterwirkung, die dazu führt, dass gewisse hohe Frequenzanteile weniger auf den Korpus übertragen werden, was den Anteil der Schärfe im Klang mindern kann.

Die Resonanz und Filterwirkung des Korpus soll hier nur dahingehend erklärt werden, dass der Resonanzkörper material- und konstruktionsbedingt spezifische Resonanzeigenschaften ausbildet, die dazu führen, dass bestimmte Frequenzbereiche stärker abgestrahlt werden als andere. Dabei stellt die Helmholtzresonanz die tiefste Resonanzfrequenz dar, die durch das eingeschlossene Luftvolumen des Korpus und die Größe der Schalllöcher, sowie die Steifigkeit der Platten bestimmt wird. Weitere wichtige Resonanzen sind Korpus- und Deckenresonanzen, sowie andere Plattenresonanzen bis in hohe Frequenzbereiche. Trifft eine angeregte Frequenz oder ein Teilton einer angeregten Frequenz auf eine Resonanzfrequenz des Systems, wird diese in der Regel verstärkt abgestrahlt. Eine differenzierte Beschreibung der Resonanzgebiete und deren Schwingungsform stellt eine Wissenschaft für sich dar. Mit Hilfe von Methoden wie Modalanalyse, Laservibrometrie oder computergestützte Simulationen wurde und wird viel an diesem Thema geforscht. Die spezifischen Resonanzstrukturen der Streichinstrumente im Einzelnen also aufzuschlüsseln, wird nicht als Ziel dieser Arbeit betrachtet.

## 2.3. Funktionsweise der menschlichen Stimme

Für die mechanische Stimmerzeugung ist das komplexe Zusammenspiel verschiedenster anatomischer Strukturen verantwortlich. Das beginnt bei der Lunge und Luftröhre in Kombination mit Zwerchfell und Zwischenrippenmuskeln, geht weiter über den Kehlkopf bestehend aus verschiedenen Muskeln und Knorpel und endet im Vokaltrakt, der durch Rachen, Mund- und Nasenhöhle sowie die Zunge geformt wird (Abb.3).

### 2.3.1. Anatomie und Physiologie

Neben der primären Funktion, beim Schlucken das Eindringen von Nahrung in die Luftröhre mit Hilfe des Kehldeckels (Epiglottis) zu verhindern, kommt dem Kehlkopf (Larynx) bei der Stimmbildung (Phonation) eine zentrale Bedeutung zu (HALL 1997, S.297 ff.). Sein Gerüst bilden die großen Schildknorpel - bei Männern als Adamsapfel zu sehen-, der darunter befindliche Ringknorpel, sowie zwei kleinere innen gelegene Stellknorpel. Diese Knorpel sind

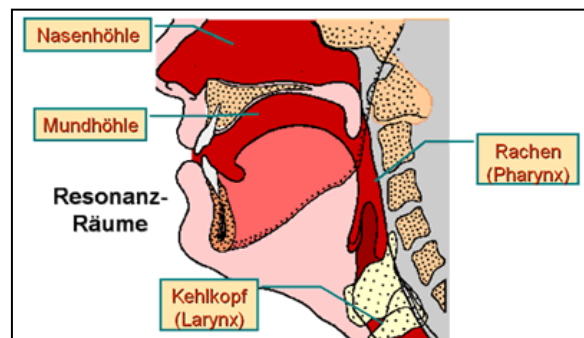


Abb. 3: Seitenansicht Resonanzräume: Kehlkopf, Rachen, Mundhöhle, Nasenhöhle (<http://www.fb10.uni-bremen.de>)

durch unterschiedliche Bänder, Muskeln und Gewebestrukturen verbunden, deren Beschaffenheit und Funktion hier im Detail nicht erläutert werden sollen. Die wichtigsten jedoch sind die Stimmlippen (auch Stimmfalten genannt). Sie spannen sich innen an der „spitzen“ Seite des Schildknorpels zu den gegenüber liegenden Stellknorpeln auf. (Abb. 4) Bei Männern sind diese i.d.R. länger und dicker, was zu der um eine Oktave versetzten Grundfrequenz der männlichen zur weiblichen Stimme führt. Der zwischen den Stimmlippen entstehende Spalt wird als Stimmritze (Glottis) bezeichnet. Durch das Zusammenspiel der unterschiedlichen Muskeln und Stellknorpel kann die Öffnung der Glottis auf unterschiedlichste Weise modifiziert werden. So wird die Glottis zum Einatmen weit geöffnet, zur Phonation hingegen ganz spezifisch unterschiedlich eng geschlossen, während die Spannung der Stimmlippen ebenfalls gezielt verändert werden kann. Bei der Phonation wird nun die Stellung und Spannung der Stimmlippen bewusst dazu genutzt, um stimmhafte (z.B. /a) oder stimmlose Laute (z.B. /f) zu bilden. Bei stimmhaften Lauten werden die Stimmlippen auf eine ganz bestimmte Art in Schwingung versetzt, während bei stimmlosen Lauten oder auch der geflüsterten Stimme die Stimmlippen nicht schwingen.

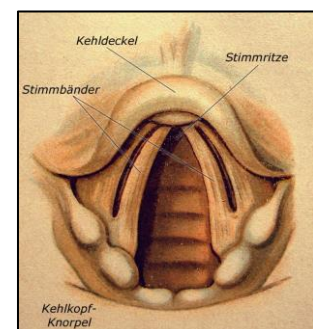


Abb. 4: Kehlkopf aus Sicht des Vokaltraktes (von oben) (<https://de.wikipedia.org>)

Beim Einatmen – in Vorbereitung zur Stimmbildung – wird die Lunge durch Kontraktion von Zwerchfell und Zwischenrippenmuskulatur mit Luft gefüllt. Während das passive Ausatmen lediglich die Entspannung dieser Muskulatur fordert, wird bei der Phonation die Kontraktion

der Bauchmuskulatur gefordert. Vor der stimmhaften Lautbildung sind die Stimmlippen geschlossen. Das aktive Ausatmen erzeugt einen gewissen Druck von unten gegen die Glottis bis sich die Stimmlippen voneinander lösen und der entstandene Überdruck in den Rachenraum entweichen kann. Die Luft passiert die im Verhältnis zu Luftröhre und Rachenraum enge Stelle der Stimmritze mit erhöhter Geschwindigkeit, was eine lokale Druckminderung zur Folge hat. Dadurch schließen sich die konstant gespannten Stimmlippen augenblicklich wieder, und der Vorgang beginnt von neuem. Bei gleichmäßigem Luftdruck und gleichmäßiger Spannung und Stellung der Stimmlippen entsteht so eine periodische Schwingung. Dieser Effekt ist auch als Bernoulli-Effekt bekannt. Die Frequenzlage des dabei generierten periodischen Signals wird durch die Spannung der Stimmlippen bestimmt, der Tonumfang ist jedoch anatomisch bedingt unterschiedlich. Die in der Pubertät bei Männern gebildeten längeren und dickeren Stimmbänder ermöglichen so eine tiefere Frequenzlage, die für normale Sprache bei 70 Hz bis 200 Hz liegt. Die Frauenstimme liegt ca. eine Oktave höher bei 140 Hz bis 400 Hz (vgl. HALL 1997, S.299). Auf den exakten Tonumfang, soll im Vergleich mit der Klangbildung von Streichinstrumenten noch eingegangen werden (siehe Kapitel 2.4).

Schaut man sich nun das durch den Luftstrom und die Stimmlippen generierte Signal noch einmal genauer an, so besteht eine Periode aus einer Phase, in der die Stimmritze geschlossen ist und sich die Stimmlippen berühren, und einer Phase, in der sie offen ist, sich die Stimmlippen also nicht berühren. (Abb.5)

Diese Offen- und Geschlossen-Phasen können durch mehr oder weniger Zusammen- drücken der Stimmlippen modifiziert werden. Dabei

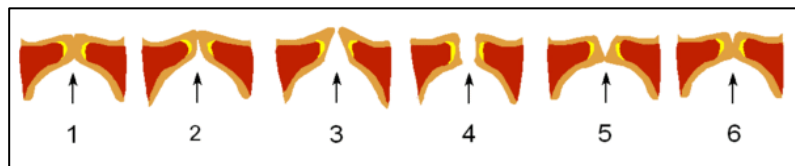


Abb.5: Querschnitt Stimmlippen: Schwingungszyklus -geschlossen- offen-Phasen (<https://de.wikipedia.org>)

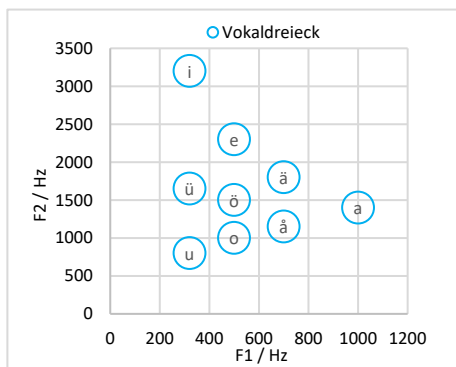
führt eine lange Geschlossen-Phase, durch stärkeres Drücken verursacht, zu einem Signal mit mehr Energie auch in den höheren Teiltönen (gepresste Stimme). Eine kurze Geschlossen-Phase generiert weniger Kraft in den oberen Teiltönen und führt zu einer gehauchten Stimme. Diese unterschiedlichen Gesangstechniken können in Strohbass, Modalstimme, Falsett (Kopfstimme) und Pfeifstimme eingeteilt werden. Beim Jodeln ist der ständige Wechsel zwischen Modalstimme (Normalstimme) und Falsettstimme charakteristisch. Die differenzierte Einteilung dieser Stimmregister ist eine Wissenschaft für sich, worüber die StimmforscherInnen unterschiedliche Ansichten haben. (<https://de.wikipedia.org/wiki/Gesangsregister>)

Der im Kehlkopf generierte Primärschall wird weiter durch die spezifische Formation des Vokaltraktes gefiltert, was zur Bildung der unterschiedlichen Phoneme unserer Sprache führt. Es wird hier in Plosivlaute (/p /b), Reibelaute (/f, /v), andere Konsonanten (/m, /n, /ng), reine Vokale (/a, /e, /i, /o, /u) und Diphthonge (/ei, /eu) unterschieden (HALL 1997, S.301 ff.). Es gibt also Klanglaute und Geräuschlaute sowie Mischformen, die unsere Sprache bilden.

Auch wenn bei Streichinstrumenten der Bogenansatz reibelautähnliche Komponenten hat, soll in dieser Arbeit lediglich die stimmhafte Komponente der Vokale berücksichtigt werden.

Vokale zeichnen sich dadurch aus, dass sie stimmhaft sind und beliebig lange auf einer oder unterschiedlichen Tonhöhen gehalten werden können. Während die Frequenz und die Wellenform des Signals durch den Kehlkopfapparat bestimmt werden, ist die Klangfarbe des Vokales durch die spezifische Beschaffenheit und Formation des Vokaltraktes abhängig. Neben der Stellung des Kiefers, der Öffnungsweite der Lippen und anderer Faktoren, ist die Lage der Zunge maßgeblich bei der Vokalbildung beteiligt. Die so gebildete spezifische „Röhre“ ist in der Lage, unterschiedliche Frequenzbereiche durch Eigenschwingungen der Luft in Form stehender Wellen stärker nach außen zu transportieren, während andere Bereiche zwar noch im Signal enthalten sind, durch die Weichheit des Mundraumes jedoch nur gemäßigt übertragen oder absorbiert werden. Diese ersteren, im Vergleich zu anderen Frequenzbereichen stärker wiedergegebenen Bereiche, werden auch Formanten genannt, im Grunde handelt es sich jedoch einfach um Resonanzbereiche. Bei der Vokalbildung werden bis zu vier solcher Formantbereiche gebildet, wobei die ersten zwei Formanten zur Erkennung des Vokals ausreichen. Für die Frequenzlage des ersten Formanten (F1) ist die Öffnungsweite des Unterkiefers maßgeblich, für die des zweiten Formanten (F2) die Lage des Zungenhauptkörpers. (siehe Abb.6)

### 2.3.2. Vokaldreieck - Vokaltrapez



Diag. 1: Vokaldreieck Vokal-Formantzentren

um 100 Hz anders als weibliche. Das abgebildete Vokaldreieck stellt einen gemittelten Wert deutscher Vokale dar (Kapitel 3.5, Tab. 2). Der Mensch ist also in der Lage, die Formantlage in einer gewissen Bandbreite zu erkennen. Zwei Faktoren, die die Unterscheidbarkeit von Formanten jedoch beeinträchtigen sind die Lautstärke und die Tonhöhe. Ist in dem für die Vokalbildung relevanten Frequenzbereich des Quellsignals z.B. bei leiser behauchter Stimme nicht genügend Energie vorhanden, können sich die Formanten auch nur schwach ausprägen. Die Artikulation von Vokalen wird für Sänger im hohen Frequenzbereich erschwert, wenn die Grundfrequenz und die dazugehörigen Teiltöne oberhalb der für einen Vokal erfordernten Formantbereiche liegen. Um

Um ein Bild über die Lage der Formanten F1 und F2 zu bekommen, hat sich das sogenannte „Vokaldreieck“ etabliert. Hier werden F1 und F2 der einzelnen Vokale in einem Diagramm auf der x- und y-Achse in Kombination dargestellt. (Diag.1) Durch den unterschiedlichen Gebrauch des Vokaltraktes in verschiedenen Sprachen oder Dialekten, oder einfach auch anatomisch bedingte Unterschiede, entsteht eine gewisse Streuung der Lage einzelner „gleicher“ Vokale. Ebenso liegen männlich gesprochene Vokale mit einer Grundfrequenz (F0)

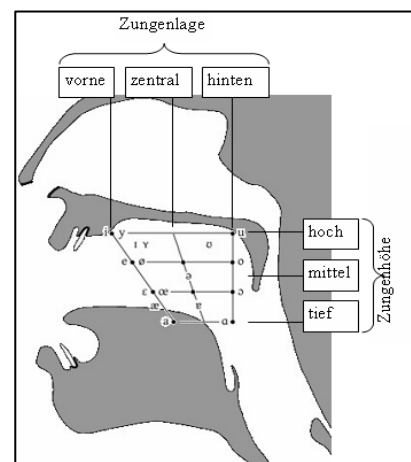


Abb. 6: Vokaltrapez-Verständnishilfe durch Zungenlage (www.sprachlog.de)

dennoch einen klangvollen Ton zu erzeugen, verschieben SängerInnen den Formantbereich auf Kosten der Klangfarbe (HALL 1997, S.313 ff.).

Aus dem Vokaldreieck heraus hat sich das Vokaltrapez entwickelt, das eine visuelle Darstellung der phonetischen Vokalsysteme der Sprache darstellt. Es ist eine etwas andere Darstellungsform des Vokaldreieckes und lässt den Zusammenhang eines Vokales mit der Zungenlage und Kieferöffnung noch besser erkennen. Wenn man sich das Trapez innerhalb des Mundraumes vorstellt (Abb. 6), so korreliert die Zungenlage (hoch, mittel, tief und vorne, zentral, hinten) mit dem am Vokaltrapez abzulesenden Vokal. Vorderzungenvokale sind z.B. das /i und /e, Hinterzungenvokale das /u und /o. In der vertikalen Ebene spricht man von offenen (/a) und geschlossenen (/i, /u) Vokalen.

Eine weitere Unterscheidung, die in der Phonetik eine Rolle spielt, ist die Differenzierung in gerundete und ungerundete Vokale. Dabei bezieht sich die Rundung auf die Rundung der Lippen, sodass ein ungerundetes /i durch die Rundung der Lippen zum /ü wird. Oder das /e zum /ö. (Abb.7)

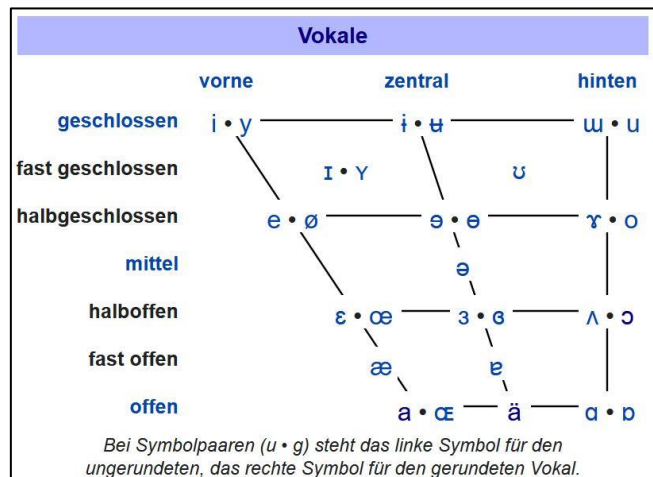


Abb. 7: Vokaltrapez: Symbolerklärung ist der Tabelle 2 in Kapitel 3.5 zu entnehmen. (<https://de.wikipedia.org>)

## 2.4. Gegenüberstellung Streichinstrumente – Stimme

Streichinstrument		Menschliche Stimme
Funktion		
<b>Energiezufuhr</b>	Kontinuierliche Streichbewegung des Bogens	Kontinuierlicher Luftdruck durch die Lungen
<b>Generator</b>	Haft-Gleit-Mechanismus zwischen Bogen und Saite (stick-slip)	Selbstoszillieren der Stimmlippen Bernoulli-Effekt
<b>Resonator / Filter</b>	Steg - Korpus	Vokaltrakt
<b>Kopplung Quelle - Filter</b>	Schwach	Schwach
Modulation		
<b>Tonhöhenkontrolle</b>	Saitenresonanz, Verkürzen der Saite durch Abgreifen	Spannung und Stellung der Stimmlippen; Stärke des Luftdrucks durch die Lungen
<b>Portamento (gleitender Tonhöhenwechsel)</b>	Möglich	Möglich
<b>Lautstärkenkontrolle</b>	Bogengeschwindigkeit; anpassen des Bogendrucks	Luftdruck der Lungen; anpassen der Spannung und Geometrie der Stimmlippen
<b>Steuerung der spektralen Neigung des Obertonanteils</b>	Kontaktstelle des Bogens auf der Saite Nahe Steg = brillant (scharf) Nahe Griffbrett = dunkel weich	Veränderung durch Spannung und Geometrie der Stimmlippen; Luftdruck gehaucht-gepresst
<b>Variable Kontrolle der Formanten</b>	Innerhalb der Aufführung durch Dämpfer; sonst Eingriff in das Instrument	Möglich durch Veränderung des Vokaltraktes
<b>Vibrato</b>	Frequenzmodulation durch Finger; gleichzeitige Klangfarbenmodulation	Frequenzmodulation durch heben und senken des Kehlkopfes; gleichzeitige Klangfarbenmodulation
<b>Tonumfang</b>	Konstruktionsbedingt	Anatomisch und trainingsbedingt
<b>Lautstärke</b> (vgl. MEYER 2015)	Geige 96 dB, Bratsche 94dB, Cello 97dB, Bass 98 dB	97 dB

*Tabelle 1: Gegenüberstellung Streichinstrument - Menschliche Stimme  
Inhalte an SCHUBERT und WOLF (2016) angelehnt und ergänzt*

Da in vorherigen Kapiteln die Funktionsweise von Streichinstrumenten und der menschlichen Stimme im Einzelnen genauer beschrieben wurden, soll nun eine direkte Gegenüberstellung Gemeinsamkeiten und Unterschiede noch einmal übersichtlich darstellen.

Die Fähigkeiten, Töne lange auszuhalten sowie das Portamento (gleitender Übergang von Tönen), sind wohl entscheidende Gemeinsamkeiten von Streichinstrumenten mit der menschlichen Stimme, die z.B. Zupfinstrumente nicht mit ihr teilen können. Bei den Blasinstrumenten fällt diese Fähigkeit des Portamentos nur der Posaune zu. Nun können mit Zupfinstrumenten oder dem Klavier beispielsweise mehrerer Töne gleichzeitig gespielt werden – eine Fähigkeit, die die Stimme (außer ansatzweise im Obertongesang) nicht besitzt. Grundsätzlich ist die Tonerzeugung bei Blasinstrumenten mit einfachem Rohrblatt, Doppelrohrblatt oder Mundstück der Stimme sehr ähnlich, allerdings beeinflusst die starke Rückkopplung des Rohres oder des Schalltrichters die Frequenzlage des gespielten Tones

unweigerlich. Bei der Stimme oszillieren die Stimmlippen auf einer gewünschten Tonhöhe weitestgehend unabhängig von der Stellung des Vokaltraktes. Es liegt also kaum eine Rückkopplung zwischen Vokaltrakt zu schwingenden Stimmlippen vor. Da die biege weiche Saite auch über den Steg eher schwach an den Resonanzkorpus gekoppelt ist – die Frequenzlage also nicht durch den Korpus beeinflusst wird – entspricht dieser Mechanismus so gesehen eher der menschlichen Stimme.

Ein Alleinstellungsmerkmal der Stimme gegenüber fast allen Musikinstrumenten ist die Fähigkeit, bei gleichbleibender Tonhöhe die Klangfarbe (Formantlage) mit Hilfe des Vokaltraktes kontinuierlich und unmittelbar zu verändern. Diese Veränderung der Formantbereiche während des Spiels ist so mit keinem traditionellen Musikinstrument möglich. Im akustischen Bereich kann das schnelle Anbringen eines Dämpfers, oder im Bereich der elektronischen Musik die Anwendung von Synthesizern eine Klangfarbenveränderung hervorrufen. Das Djiridoo, mit welchem es möglich ist Frequenzbereiche während des Spiels um bis zu 10 dB zu verändern, bildet hier eine Ausnahme. Diese Veränderung ist allerdings eben gerade auch der Veränderung des menschlichen Vokaltraktes während des Spiels zuzuschreiben; allerdings kann das Djiridoo nur monoton auf einer Tonhöhe gespielt werden, die üblicherweise noch unter der Grundfrequenz der Sprechstimme liegt, sodass der Klang nicht gerade stimmähnlich wirkt (SCHUBERT und WOLF 2016). Auch die Maultrommel lässt diese Formantveränderung zu, was wiederum nicht verwundert, da der Resonator durch den menschlichen Vokaltrakt gestellt wird. Was die Streichinstrumente auch gegenüber anderen Instrumentengattungen mit der Stimme teilen, ist der eher niedrige maximale Schalleistungspegel um 97 dB. Damit sich dennoch die Gesangsstimme gegenüber einem Orchester durchsetzen kann, ist der Mensch in der Lage den sogenannten „Sängerformanten“ auszubilden (SUNDBERG 1977). Analog hierzu wird bei Geigen die Ausprägung des Bridge-Hills Features diskutiert, was die Ausprägung erhöhter Resonanzen um 3000 Hz bedeutet (WOODHOUSE 2005).

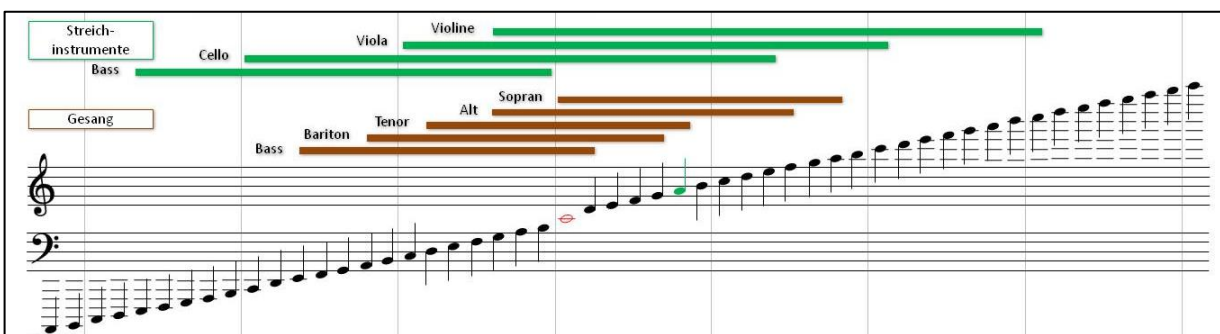


Abb. 8: Tonumfang Stimme – Streichinstrumente  
Ausschnitt aus <https://www.heuchelberger-alphornbrass.de>

Betrachtet man nun eine Übersicht des Tonumfanges (Abb.8) der einzelnen Instrumente, kann man feststellen, dass der Tonumfang des Cellos tiefer als der der Basssänger reicht und nahezu die obersten Töne des Soprans miteinschließt. Die Bratsche beginnt zwischen Bariton und Tenor und bei der Geige deckt sich der Tonumfang in den tiefen Lagen beginnend am besten mit dem Sopran. Anstatt zu fragen, welches Instrument der menschlichen Stimme am ähnlichsten ist, kann hier eigentlich nun nur noch die Frage gestellt werden, welches Instrument

sich mit welcher menschlichen Stimme am meisten deckt. Man wird sich wohl kaum eine Aussage vorstellen können, „die berühmte griechisch-amerikanische Opernsängerin Maria Callas habe gleich einem Cello geklungen“. Eher denkbar wäre eine Formulierung, wie: „müheles erklimmte die Sängerin die höchsten Töne, wie sie ein Geigenspieler nicht hätte besser treffen können“. Ähnliche entgegengesetzte Formulierungen könnte man für einen Bass oder Tenorsänger finden.

Oft geht es bei Vergleichen eines Instruments mit der Stimme auch nur metaphorisch um die Anerkennung besonders guter Ausdrucksmöglichkeit wie SCHUBERT und WOLF bereits argumentieren, sodass es eigentlich auch nicht ganz so wichtig ist, ob nun der Cellist mit einem Sopran oder der Geiger mit einem Tenor in Verbindung gebracht wird. Konzentriert man sich jedoch auf die physikalisch-akustischen Eigenschaften der Instrumente, muss der Tonlage doch Beachtung geschenkt werden. Wenn man vorher festgestellt hat, dass die weibliche Stimme in ihrer Grundfrequenz anatomisch bedingt ca. eine Oktave höher als die männliche liegt, so muss man auch den Streichinstrumenten eingestehen, dass „anatomisch“ bedingt diese ihren jeweils spezifischen Frequenzbereich abdecken. Dies spiegelt sich auch in der Stimmverteilung eines Streichquartetts wider.

Letztendlich handelt es sich bei beiden Instrumenten „Stimme“ und „Streichinstrument“ um akustische Werkzeuge, die der Mensch mit Hilfe des Gehirnes als Initiator und Regulator zu bedienen versucht, um musikalische Klänge zu erzeugen. Man spricht ja auch von einem vierstimmigen Satz, und meint dabei z.B. zwei Geigen, eine Bratsche und ein Cello. Unter dieser Argumentation, kann der Instrumentalklang schlicht als Erweiterung der menschlichen Stimme betrachtet werden, die in jedem Instrument eine Bereicherung der Klangpalette findet.

Die in der Literaturrecherche gewonnenen Einblicke in die physikalisch-akustischen Zusammenhänge stellen nun die Grundlage dar, auf die im Folgenden aufbauend einige physikalisch-akustische Experimente durchgeführt werden sollen. Es zeigte sich, dass die Vokale als stimmhaftes Glied in der Sprachbildung der Teil in der Sprache sind, der für die Singstimme relevant ist, bzw. Gesang erst möglich macht. Außerdem ergab die Literaturrecherche, dass die Existenz formantbildender Resonanzgebiete bei Streichinstrumenten durch wissenschaftliche Untersuchungen bereits mehrfach nachgewiesen wurde. Dass eine Differenzierung der Vokale durch die spezifische Lage von F1 und F2 zum einen möglich und zum anderen nötig ist, ist jedoch im allgemeinen Bewusstsein vielleicht noch nicht so verankert. Diese aber stellt sicher, dass man in der Kommunikation mit einer Person über „Vokalfarben“, wirklich auf dem gemeinsamen Nenner ist. Da es nicht unüblich ist, dass GeigenbauerInnen versuchen, Klangfarbenbeschreibungen mit Hilfe der Vokale vorzunehmen, besteht die Hoffnung, dass dahingehende Untersuchungen eine wertvolle Bereicherung für InstrumentenbauerInnen und Musizierende darstellen können.



### **3. Planung und Durchführung akustischer Experimente**

#### **3.1. Vokalformanten als Fokus der Untersuchungen**

Klang bzw. Klangfarben zu beschreiben ist sehr schwierig. Es gibt nur wenige klar definierte physikalische Größen wie Lautheit, Rauigkeit und Schärfe, außerdem spielen psychoakustische Phänomene eine bedeutende Rolle. Da die Bildung von Formanten, wie oben bereits erwähnt, eine gemeinsame Basis der Stimme und der Streichinstrumente darstellt, soll ihnen in den messtechnischen Untersuchungen dieser Arbeit das Hauptaugenmerk gelten. Andere wie auch oben genannte Attribute werden vernachlässigt. Auch wenn bekannt ist, dass bestimmten Frequenzbereichen Vokalfarben zugeordnet werden, wie MEYER oder DÜNNWALD es beschreiben, scheint die Bedeutung für die InstrumentenbauerInnen möglicherweise unterschätzt. Es ist spannend, sich einmal aktiv mit dieser Thematik zu befassen, um ggf. Methoden zu entwickeln, die bei der Beurteilung des Klanges von Instrumenten – auch im Austausch mit den Musizierenden – hilfreich sind. Der Ansatz MÜLLERS und MORES (2008), eine LPC-basierte Extraktion (Linear Predictive Coding) der Vokalqualität zur Abbildung in einem Vokaldiagramm vorzunehmen, ist äußerst interessant. Die Methodik besteht darin, Einzeltöne der Geige im Hinblick auf die ersten Hauptformanten zu untersuchen und durch den Versuch des klangfarbengetreuen Nachsingens dieser Töne, die Vokalqualität des Klanges selbst zu erforschen und letztlich selbsterklärend zu formulieren. Allein durch die eigene Formulierung kann so schon in „Vokalworten“ gesagt werden, ob der Klang z.B. mehr /u /o oder /ä klingt oder mehrere Komponenten enthalten sind. Das Auslesen der Formanten aus dem nachgesungenen Ton ermöglicht einen Abgleich im Vokaldiagramm mit dem Originalton des Instrumentes. MÜLLER und MORES deuten bereits auf mögliche Grenzen und Schwierigkeiten bei der LPC-basierten Auslesung der Formanten hin, dennoch sollte ein Versuch gewagt werden, auf ähnliche Weise eigene Untersuchungen vorzunehmen. Da MÜLLER und MORES lediglich die Geige untersuchen, sollen in dieser Arbeit auch das Cello und die Bratsche mit in die Untersuchungen aufgenommen werden. Die Möglichkeit, mit der eigenen Stimme Klänge von Streichinstrumenten imitieren zu können, wäre ein weiterer Beweis für eine „Bejahung“ der Verwandtschaftsfrage.

In dem Bewusstsein, dass bereits die Vorstellung darüber, was unter dem Begriff „Klangfarbe“ verstanden wird große Schwierigkeiten bereitet (vgl. ZIEGENHALS 2017b, S.139), soll dieser im Folgenden jedoch mit dem von MÜLLER und MORES eingeführten Begriff „Vokalqualität“ gleichgesetzt verwendet werden. Vokalqualität wiederum ist, wie in Kapitel 2.1. bereits erwähnt, nur als ein Aspekt des Gesamtklangbildes zu verstehen.

### 3.2. Wahl und Entwicklung der messtechnischen Methodik

In zu MÜLLER und MORES (2008) ähnlichen Untersuchungen verwendeten TAI et al. (2018) die Software PRAAT zur Umsetzung der LCP-Analyse von Geigenklängen. Diese Software hat sich im Bereich der Sprach- und Kommunikationswissenschaften als Quasistandard etabliert und wird hauptsächlich für phonetische Analysen verwendet. Durch die freie Verfügbarkeit dieser Software stellte dies eine Möglichkeit dar, eigene LPC-basierte Untersuchungen vorzunehmen. Auch wenn die Software in der Verwendung zur Analyse der menschlichen Stimme dank einer ausführlichen deutschsprachigen Anleitung von J. MAYER (2017) auch für unerfahrene Nutzer das Auslesen der Formanten ermöglicht, war dies im Falle der Analyse von Instrumentenklängen nicht so leicht umzusetzen. Dies dürfte u.a. an der Vielzahl der auftretenden Resonanzspitzen innerhalb eines Instrumentenklanges liegen. Im Grunde muss man innerhalb des „Formant-Settings“ der Software die Parameter so einstellen, dass man vorgibt, bis zu welcher Frequenz man wie viele Formanten auslesen möchte. Das wiederum bedarf der vorherigen Betrachtung des Spektrums, um entscheiden zu können, wie viele Formanten innerhalb eines bestimmten Frequenzbereiches erwartet werden. Würde dieser Vorgang als Hilfe zur Klangdokumentation in den Werkstattalltag einfließen, wäre ein automatisiertes Verfahren hilfreich, wie MORES es bereits entwickelt hat. Mangels der Verfügbarkeit eines solchen automatisierten Verfahrens soll versucht werden, formantprägende Teiltöne durch das optische Analysieren des Frequenzspektrums zu erkennen. Die dabei gewonnenen Daten werden in Excel weiterverarbeitet.

Zur Erstellung und Analyse der Daten wurde das Programm VoceVista Video Pro verwendet, das im Folgenden abgekürzt VVV genannt werden soll. Auch wenn der Nutzungsumfang dieser Software nicht in vollem Maße in diese Arbeit eingebunden wurde, sollen ihre Vorzüge mit Hinweis auf ein interessantes und nutzerfreundliches Tool, als Hilfe für ein allgemeines besseres Klangverständnis, kurz vorgestellt werden.

Die Software VVV, wurde von Bodo Maass, Wolfgang Saus und Don Miller zur allgemeinen interaktiven Aufnahme und Erforschung von Klängen entwickelt und zeigt im Bereich der Gesangslehre seine volle Stärke. Durch die visuelle farbige Darstellung der Klänge mit ihren einzelnen Obertönen können klangliche Zusammenhänge schnell erfasst und dokumentiert werden. Mit Hilfe von Obertonschiebern und Frequenzfiltern ist es möglich, in Echtzeit interaktiv einzelne Frequenzbereiche herauszufiltern oder zu verstärken, sodass unmittelbar Unterschiede im Spektrum während des Abspielens einer Audiospur gehört werden können. Der direkte Bezug zu einer Klaviatur sowie die Erkennung der Grundfrequenz von Tönen erleichtert den musikorientierten Anwendern, die Brücke zwischen dem Frequenzspektrum und den analysierten Musiknoten zu schlagen. Weiterhin ist es möglich, die spektrale Hüllkurve über längere Passagen einer Aufnahme zu legen, sowie durch das Setzen von Markierungen, einzelne Ausschnitte einer Aufnahme zu beschriften, um deren Spektren übereinandergelegt vergleichen zu können. Weiterhin bietet ein Vokaldiagramm die Möglichkeit, klangliche Zusammenhänge der Formantbereiche im Frequenzspektrum der Vokale besser zu verstehen und mit Hilfe des Tongenerators, Klänge synthetisch zu modulieren. Die Verwendung eines Elektrogloggographen ermöglicht die synchrone Aufzeichnung des Stimmlippensignals sowie

des resultierenden Schalls, sodass SängerInnen ein Bild darüber bekommen können, ob das Quellsignal der Stimmlippen z.B. eher gehaucht oder gepresst erzeugt wird.

Die in dieser Arbeit verwendete Hardware beschränkt sich auf ein einfaches Notebook mit Windows 10. Zur Aufnahme wurde ein portabler Audiorecorder (Olympus LS-14) verwendet, der sich über USB mit dem PC verbinden lässt.

### 3.3. Auslesen der Formanten der gesprochenen Vokale mit PRAAT

Innerhalb von PRAAT wurden die Vokale /a /e /i /o /u und Umlaute /ü /ö /ä einmal von einer männlichen (Autor) und einmal von einer weiblichen Person als Sound aufgenommen und auf die Lage der Formanten F1 und F2 hin untersucht (Abb. 9). Die Grundfrequenz lag bei der männlichen Person um 125 Hz und bei der weiblichen um 210 Hz. Es lässt sich gut erkennen, dass die Platzierung der Vokale im Vokaldreieck von der Person bzw. vor allem auch durch den anatomischen Unterschied von Mann zu Frau abhängt (Diag. 2). Neben der tendenziell eher kürzeren Vokaltraktlänge bei Frauen beeinflusst schon die Sprachgrundfrequenz die Formantlage. Zu Kindern wird der Unterschied nochmal deutlicher.

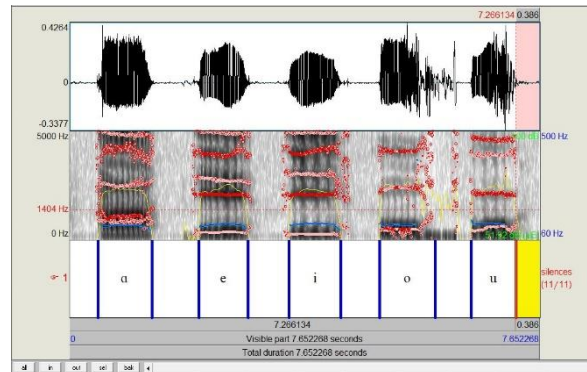
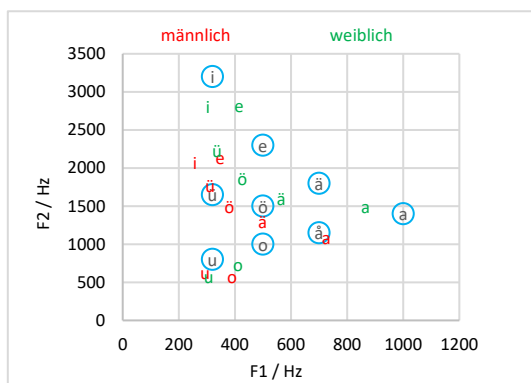


Abb. 9: Analyse der Formanten mit PRAAT



Diag. 2: Mit PRAAT analysierte männliche und weibliche Vokale im Vergleich mit dem gemittelten Vokaldreieck

Im Vergleich mit dem gemittelten Vokaldreieck des deutschen Vokalsystems ist ersichtlich, dass die Versuchspersonen in sich jeweils die gleiche tendenzielle Lage der Vokale zueinander aufweisen, jedoch die absolute Abweichung zum gemittelten Vokaldreieck manchmal sehr groß ist. Das männliche /a/ positioniert sich z.B. beim /å/ (Vokal der schwedischen Sprache gesprochen wie das o in „Loch“ oder „offen“). Auch siedeln sich das weibliche und männliche /ä/ eher beim /ö/ des gemittelten Vokaldreiecks an.

Die hier auftretenden Unterschiede zeigen, wie relativ die Meinung über den Klang eines bestimmten Vokales ist bzw., dass man bei Unterhaltungen über Klangfarbe mit Hilfe der Vokale sehr differenzieren muss. Das Sprachverständnis ist also das Eine, die musikalische Interpretation der Klangfarbe das Andere. Durch das Abbilden eines persönlichen Vokaldreieckes, bzw. durch den Versuch, die eigene Stimme mehr in die Richtung des gemittelten Vokaldreieckes zu modifizieren, könnte man sehr gut die soeben festgestellte Relativität für sich in einen objektiv ermittelten Kontext stellen. Allerdings muss man für die exakte Formantlage immer auch die Grundfrequenz F0 berücksichtigen, da diese durch die spezifische Obertonstruktur eine wichtige Rolle spielt.

### **3.4. Tonleiteraufnahmen mit VoceVista Video Pro und Datenverarbeitung in Excel**

Da die Messungen nicht auf eine absolute Vergleichbarkeit abzielen, wurde – auch aus organisatorischen Gründen – auf die Aufnahme im schallarmen Raum verzichtet. So fanden die Aufnahmen im privaten Wohnzimmer statt, das eine eher trockenere Akustik aufweist, was positiv zu bewerten ist. Für eine im Werkstattalltag taugliche Herangehensweise müssten vergleichende Untersuchungen in verschiedenen Räumen, bzw. einem schallarmen Raum stattfinden. Die in dieser Arbeit verwendeten Instrumente sind alle während des Studiums vom Autor gebaut und entsprechend dokumentiert (Geige 3. Semester; Bratsche 2. Semester; Cello 4. Semester). Für genauere Daten möge man sich bitte an die Bibliothek der Fachhochschule wenden. Der Abstand des Mikrofons zum Instrument bei den Aufnahmen betrug ca. 1,5 m.

Auf den jeweiligen Instrumenten wurde eine Tonleiter in C-Dur auf der tiefsten Saite beginnend vom Autor gespielt und mit VVV aufgenommen. Es wurde darauf geachtet einen möglichst gleichmäßigen Ton mittlerer Lautstärke (mf) und mit gleicher Bogenposition zwischen Steg und Griffbrett zu erzeugen. Durch die Einzelaufnahme der Töne innerhalb einer Spur werden automatisch Markierungen angelegt, die sich später leicht mit den Notennamen beschriften lassen. Außerdem lässt sich per Klick ein über den Aufnahmebereich gemittelt Langzeitspektrum anzeigen. Die Hauptpektralspitzen, die i.d.R. die einzelnen Teiltöne markieren, können dargestellt und als Datensatz exportiert werden. Mit Hilfe der Verknüpfung eines interaktiven Vokaldiagrammes innerhalb von VVV können mit zwei „Formantlinealen“ (Abb. 10) die Frequenzen F1 und F2 abgelesen und in ein Vokaldiagramm übersetzt werden. In dieser Arbeit wurde diese Möglichkeit als optische Hilfe während der in Excel vorgenommenen Datenauswertung genutzt. Das mehrmalige Anspielen des gleichen Tones ließ klar ähnliche Tendenzen in der Obertonstruktur erkennen, sodass auf Mittelungen über mehrere Aufnahmen hier verzichtet wurde.

### **3.5. Auslesen der Formanten**

Um die den Vokalen zuzuordnenden relevanten Formanten zu identifizieren, wurden zunächst einige Eckpunkte festgelegt. Es geht also darum, neben der Grundfrequenz F0 den ersten und zweiten Hauptformanten F1 und F2 ausfindig zu machen. Damit unser Sprachverständnis funktioniert, befindet sich die Grundfrequenz bei Männern, wie oben bereits erwähnt um 70 Hz bis 100 Hz und bei Frauen etwa eine Oktave höher.

Damit das Empfinden einer Vokalfarbe im Instrumentenklang auftreten kann, sollte idealerweise die Grundfrequenz innerhalb der Grundfrequenz der Sprechstimmen liegen. Das funktioniert bei den tiefen Tönen von C (65 Hz) bis c1 (263 Hz) ganz gut. Problematisch wird es, wenn sehr starke Hauptresonanzen des Instrumentes im Grund- oder zweiten Teilton auftreten, wie z.B. bei den Tönen des Cellos f (174 Hz) oder F (87 Hz). Dass die Grundfrequenz gleichzeitig als erste Formantfrequenz ( $F_0=F_1$ ) erkannt wird, sollte also möglichst erst ab ca. 300 Hz gestattet sein. Dies entspricht auch der allgemein gültigen Frequenzlage des Hauptformanten (F1) des Vokales /u um 320 Hz (Tab. 2). Als Obergrenze für F1 wird 700 Hz

festgelegt, dies entspricht der Frequenzlage von F1 des Umlautes /ä. Der höchste noch analysierbare Ton ist folglich die Note f2 mit 698 Hz.

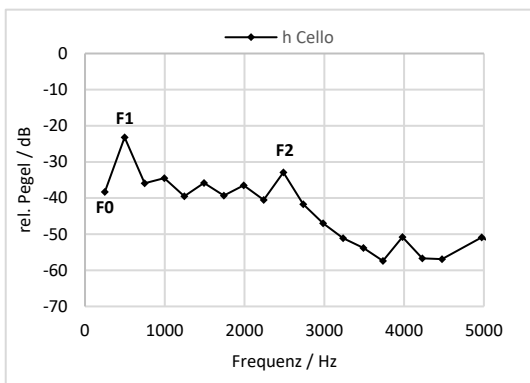
Die praktische Umsetzung des Auslesens der formantbildenden Teiltöne stellte eine gewisse Herausforderung dar. Da die Ausprägung, also das Abzeichnen der Peaks, zu den benachbarten Peaks mal sehr deutlich und manchmal weniger deutlich ausgeprägt ist und der allgemeine Gesamtverlauf sehr unterschiedlich ausfällt, mussten von Ton zu Ton gewisse Abwägungen getroffen werden. Manchmal bietet das Spektrum durch das Ausbilden mehrerer eng nebeneinanderliegender Formanten unterschiedliche Möglichkeiten der Positionierung von F1 und F2. So kann gewissermaßen eine Bi-Vokalqualität abgelesen und meines Erachtens auch herausgehört werden, was die Sache sehr komplex macht. Die Ergebnisse dürfen daher nicht als absolut betrachtet werden. Bei hohen Tönen wird es oft sehr schwierig, nach den oben beschriebenen Kriterien eine sinnvolle Vokalqualität abzulesen. Allein tonhöhenbedingt kommen mehr /e- und /i- Anteile mit in das Klangbild.

Nach den oben beschriebenen Kriterien wurden nun die Aufnahmen der Tonleitern des Cellos, der Bratsche und der Geige hinsichtlich der Position der ersten zwei Hauptformanten ausgewertet, sodass die Werte F1 und F2 in ein Vokaldiagramm übertragen werden konnten. Unter den sehr verschiedenen Vokaldiagrammen, die teilweise spezifisch für Männer und Frauen oder auf eine bestimmte Sprache ausgelegt sind, wurden hier, wie oben bereits erwähnt, die Werte der gemittelten Formantzentren der deutschen Vokale verwendet. (Tab. 2)

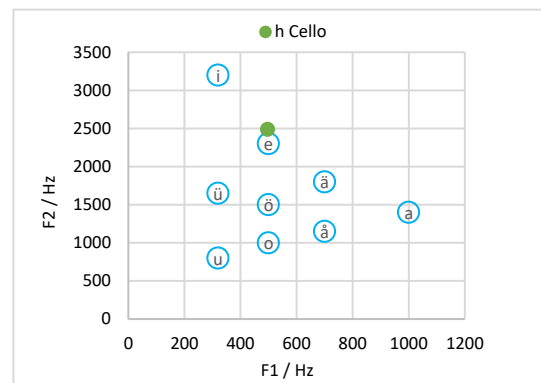
Vokaldreieck Vokal-Formantzentren			
deutscher Vokal	IPA	Formant F1	Formant F2
U	u	320 Hz	800 Hz
O	o	500 Hz	1000 Hz
ä	a	700 Hz	1150 Hz
A	a	1000 Hz	1400 Hz
ö	ø	500 Hz	1500 Hz
ü	y	320 Hz	1650 Hz
ä	e	700 Hz	1800 Hz
E	e	500 Hz	2300 Hz
I	i	320 Hz	3200 Hz

Tabelle 2: gemittelte Formantlage der Vokale (<https://de.wikipedia.org>)

Zunächst soll anhand der Cellonote h (248 Hz) ein Beispiel gezeigt werden, wo das Auslesen der Formanten kein Problem darstellt (Diag. 3 u. 4).



Diag. 3: Einzeltenspektrum h-Cello (248 Hz)

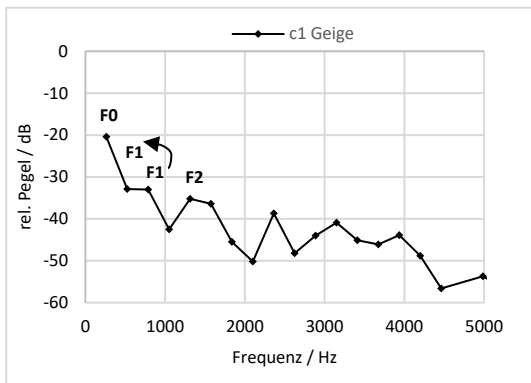


Diag. 4: Position h-Cello (248 Hz) im Vokaldreieck

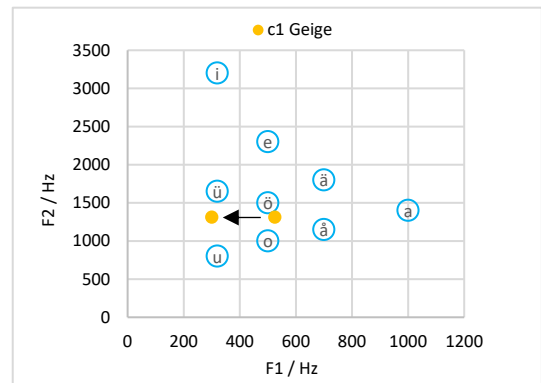
Der Grundton des Tones h bei 248 Hz stellt hier F0 dar. Der zweite Teilton (erster Oberton) bei 497 Hz scheint sich als F1 formantprägend abzuheben. Für F2 scheint das bei 2487 Hz der Fall zu sein.

Weiterhin soll nun anhand einer Note, die Geigen-, Bratschen- und CellospielerInnen jeweils in der ersten Lage spielen können, exemplarisch gezeigt werden, wie sie auf die Lage ihrer Formanten hin untersucht wurden. Durch den späteren Versuch, diese Töne nachzusingen, soll eine Aussage über ihre Vokalqualität getroffen werden. Die Note c1 (262 Hz) wird auf dem Cello mit dem zweiten Finger auf der höchsten Saite (A-Saite) gespielt, auf der Bratsche mit dem dritten Finger auf der zweit untersten (G-Saite) und auf der Geige mit dem dritten Finger auf der tiefsten Saite (G-Saite).

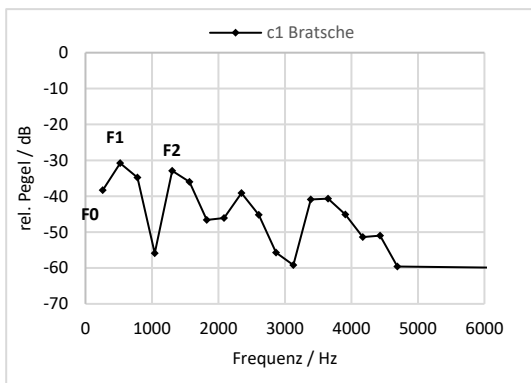
Vergleicht man die Spektralkurven der Geige und der Bratsche miteinander, so müsste nach den oben genannten Kriterien ( $F1 > 300$  Hz) F1 jeweils bei Bratsche und Geige bei 525 Hz, also auf dem zweiten Teilton, platziert werden (Diag. 5–8).



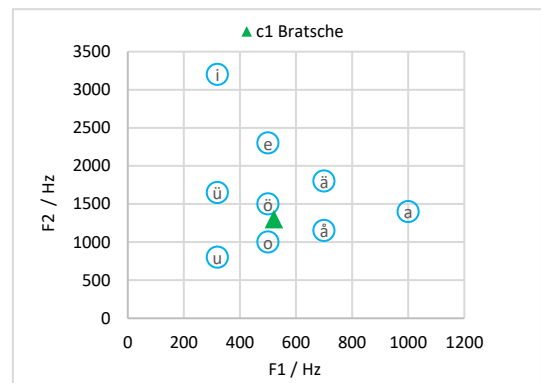
Diag. 5: Einzeltonspektrum c1-Geige (262 Hz)



Diag. 6: Position c1-Geige (262 Hz) im Vokaldiagramm



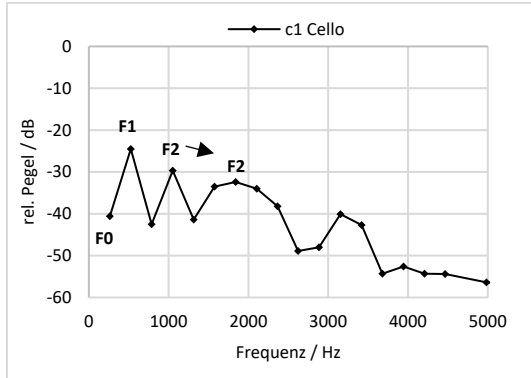
Diag. 7: Einzeltonspektrum c1-Bratsche (260 Hz)



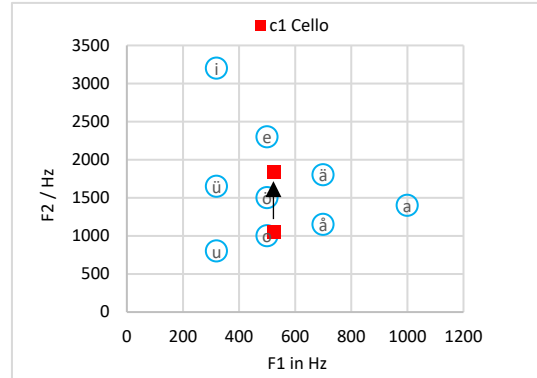
Diag. 8: Position c1-Bratsche (260 Hz) im Vokaldiagramm

Beide Klänge bilden auch bei ihrem fünften Teilton das zweite formantbildende Maximum ( $F2 = 1300$  Hz). Das bedeutet für das Vokaldiagramm die gleiche Positionierung des Geigen- und Bratschentones nahe dem Umlaut /ö, was jedoch subjektiv im Klang nicht nachvollzogen werden kann. Da offensichtlich beim Geigenklang, bedingt durch die Hohlraumresonanz, der erste Teilton (262 Hz) deutlich stärker resoniert, macht es Sinn, F1 auf diese Frequenzlage zu legen oder zumindest in diese Richtung zu verschieben. Möglicherweise wäre es sinnvoll für einen solchen Fall einer erhöhten Resonanz von F0 gegenüber den restlichen Teiltönen, um die Regel  $F1 > 300$  Hz nicht zu verletzen, F1 automatisch auf 300 Hz herabzusetzen oder die mittlere Frequenzlage zwischen dem ersten und zweiten Teilton zu wählen.

Für die Lage des Geigentones c1 im Vokaldiagramm bedeuten diese Veränderungen von  $F1=535$  Hz runter zu  $F1=300$  Hz, dass eine deutliche Verschiebung vom /oö zum /üü stattfindet. (Diag. 6) So stellt man fest, dass verschiedene Möglichkeiten der Interpretation der Vokalqualität in diesem Klang vorhanden sind.



Diag. 9: Einzeltonspektrum c1-Cello (262 Hz)



Diag. 10: Position c1-Cello (262 Hz) im Vokaldiagramm

Bei dem Ton c1 des Cellos (Diag. 9 u. 10) bilden sich zwar schöne Hauptformanten aus, sodass man geneigt ist, gleich die ersten Peaks 525 Hz (2. Teilton) und 1050 Hz (4. Teilton) als die für eine Vokalqualität maßgeblichen Formanten zu deklarieren; der subjektive Hörvergleich verrät jedoch, dass ein warmer /o -Charakter nicht ganz dem Klangbild entspricht. Auffällig in der Spektrumskurve des Cellos ist der breite, sich um 1839 Hz ausbildende Peak, sodass dieser sicher im Klangbild nicht zu vernachlässigen ist, oder sogar den Klang gegenüber dem Peak um 1050 Hz dominiert/verdeckt. Entscheidet man sich also für  $F2=1939$  Hz, so wechselt die Position im Vokaldiagramm von /o nahezu bis zum /e. Dies wiederum entspricht auch eher dem subjektiv empfundenen Klangbild.

Um das oben beschriebene Vorgehen beim Auslesen der formantbildenden Teiltöne besser nachvollziehen zu können, oder auch mögliche unwissentliche Fehler zu evaluieren, sind die Einzeltonspektren aller Töne sowie die Tabelle der ausgelesenen Formanten im Anhang ersichtlich.

### 3.6. Vokalqualitätsprüfung durch Nachsingen einzelner Töne

Es wurde nun versucht den Ton c1 des jeweiligen Instrumentes nachzusingen. Hierzu wurde die zuvor ermittelte Vokalqualität als ungefähre Orientierung bedacht. In VVV lassen sich die Spektren zweier Dateien nebeneinander öffnen. (Abb. 10) Man kann nun das gemittelte Spektrum z.B. des Geigenklanges anzeigen lassen, den Ton anhören und in der zweiten geöffneten Datei die Aufnahme des gesungenen Tones vornehmen. Während der Aufnahme kann nun in Echtzeit das Spektrum des erzeugten Signales angezeigt werden, sodass man praktisch die im Langzeitspektrum dargestellte Kurve des Geigentones „ansingen“ kann. Man sieht dabei sehr genau, wie sich die Lage der formantbildenden Obertöne verschiebt, je nach Formung des Vokaltraktes. Wenn man glaubt, die richtige Vokaltraktstellung gefunden zu haben, macht man noch einmal eine kurze extra Aufnahme in dieser Position und kann darüber ein Langzeitspektrum erstellen. Das Kreuz in dem rechten oberen Vokaldiagramm ist mit den senkrechten Linien im Spektrum verknüpft, sodass die Positionierung der „Formantschieber“ im Spektrum die Position von F1 und F2 anzeigen. Die Spektren der so nachgesungenen Aufnahmen wurden nun nach Excel exportiert, um die Formanten innerhalb des gemittelten Vokaldreieckes abzubilden, und in Tabellenform zu dokumentieren. Die Ergebnisse werden in Kapitel 4.2 diskutiert.



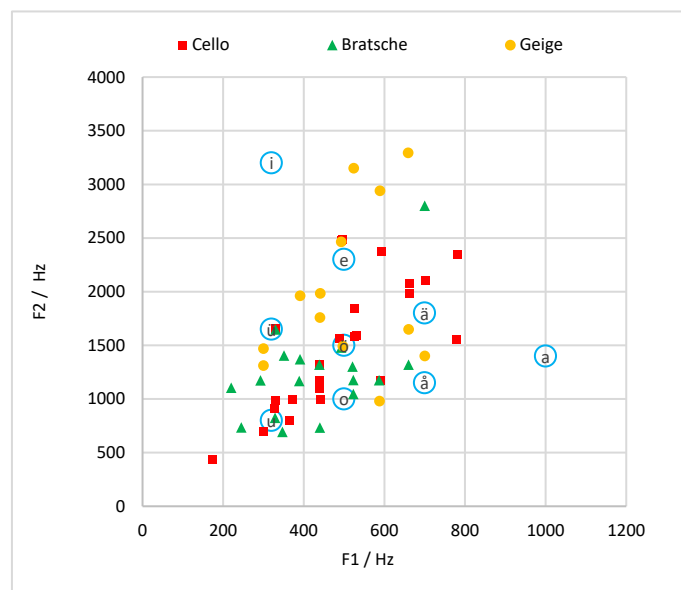
Abb. 10: „Ansingen“ des Tones c1 des Cellos: oberes Fenster links rot= Einzeltenspektrum Cello; unteres Fenster links bunt=Spektrum des nachgesungenen Tones; rechts oben interaktives Vokaldiagramm mit „Formantlinealen“; rechts unten Datei- u. Markierungsmanager



## 4. Ergebnisse und Diskussion der akustischen Untersuchungen

### 4.1. Analyse der Tonleitern anhand des Vokaldiagramms

Betrachtet man nun die Positionen der einzelnen Töne aller Instrumente in einem Vokaldiagramm (Diag. 11), so lässt sich feststellen, dass auf den ersten Blick erst einmal alle Instrumente etwas im Bereich des Vokaldreiecks zu bieten haben. Man müsste nun erwarten, aus der spezifischen Lage der einzelnen Töne Rückschlüsse auf die Hauptresonanzen der einzelnen Instrumententypen schließen zu können.

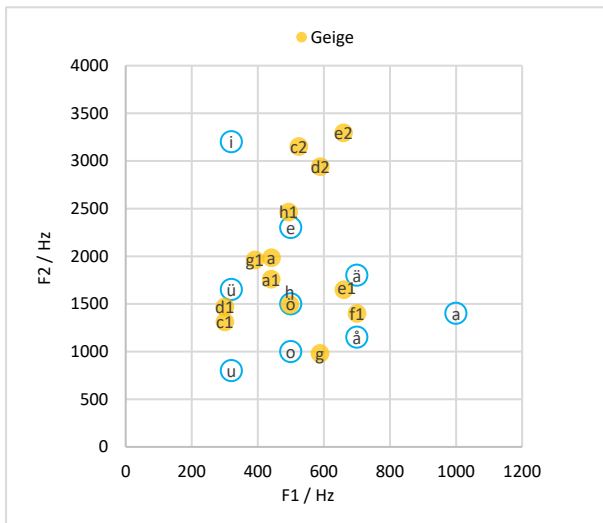


Diag. 11: Position der Tonleiter C-Dur Geige, Bratsche, Cello (C-f2) im Vokaldiagramm

Im Folgenden werden die Vokaldiagramme von Geige, Bratsche und Cello jeweils einzeln genauer analysiert.

Da zu jedem Instrument bereits eine Messung der Frequenzkurve vorlag, war die spontane Idee, diese in die Analyse mit einzubeziehen, auch wenn die Messungen unter anderen Bedingungen durchgeführt wurden. Die Frequenzkurve wurde direkt nach der Fertigstellung der Instrumente im jeweiligen Semester zur Dokumentation im IFM in Zwota im reflexionsarmen Raum erstellt. Sie stellt ein standardisiertes Verfahren zur Analyse des übertragenen Schalldruckpegels der Instrumente dar. Das Schallereignis wird durch jeweils 10 Impulshammerschläge aus vertikaler und horizontaler Richtung auf die Stegoberkante ausgelöst und von drei Mikrofonen aus jeweils einem Meter Entfernung und unterschiedlichen Raumrichtungen der Schalldruckpegel gemessen. Ausgewertet wird ein über alle Werte gemitteltes Ergebnis (ZIEGENHALS 2017a, S. 142–143). Die Spektren der Teiltöne der Note c1 sollten jeweils über die Frequenzkurve des entsprechenden Instrumentes gelegt werden.

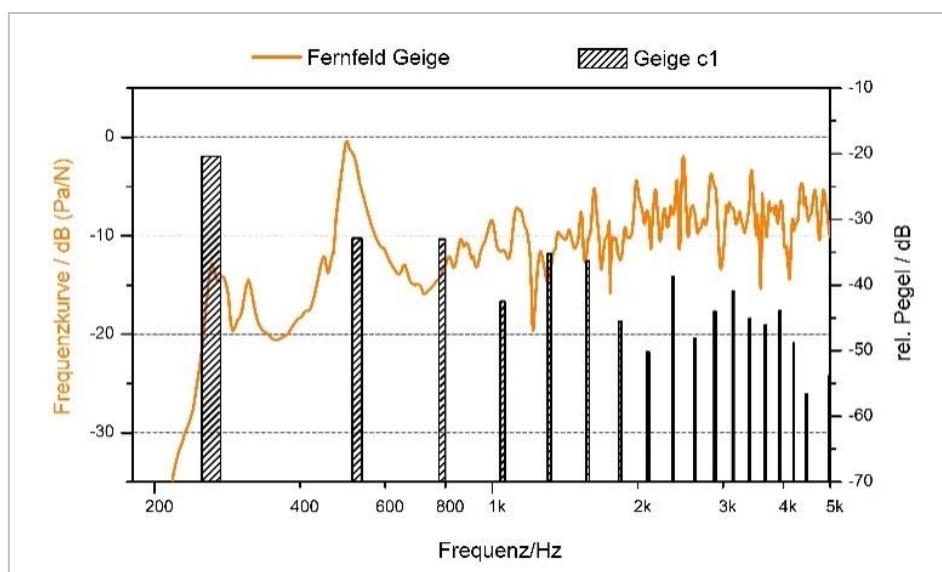
### 4.1.1. Tonleiter Geige



Diag. 12: Position Töne g-f2 Geige im Vokaldiagramm

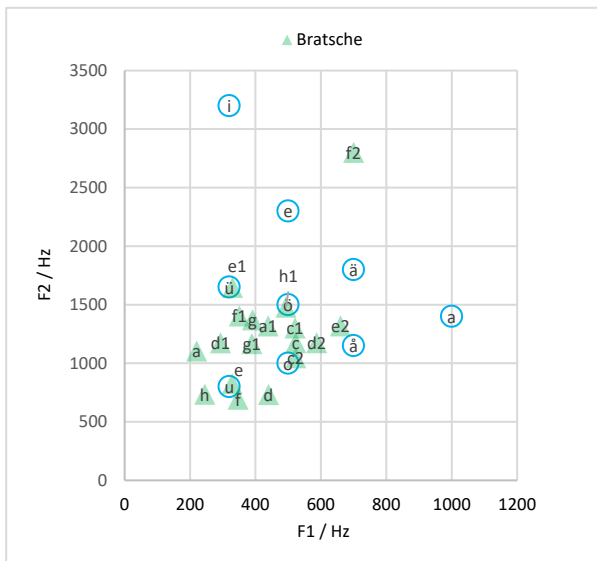
Die Töne der Geigentonleiter sind innerhalb des Vokaldreieckes recht weit verstreut (Diag. 12). Gegenüber Cello und Bratsche gibt es weniger Noten, die dem Vokal /u oder /o am nächsten sind. Da das Geigenregister erst auf der Note g (196 Hz) beginnt, haben ihre Töne durch den Obertonaufbau naturgemäß weniger die Möglichkeit, auf einen F1 in dem für den Vokal /u prägenden Formantbereich um 320 Hz zu treffen. Am Beispiel der Note c1 kann man sehr gut erkennen, dass hier die Hohlraumresonanz einen starken Einfluss auf die Vokalqualität in /u-Richtung hat. Das Gleiche gilt für die

leere D-Saite (d1). Der stark ausgeprägte Resonanzbereich um 500 Hz in der Fernfeldmessung ist auf die Hauptdeckenmoden der Geige zurückzuführen (Diag. 13). Dieser Bereich ist bei den meisten Tönen stark formantbildend. Ab dem c2 (523 Hz) entweicht die Vokalqualität in Richtung /e und /i, wobei hier der Grundton mit einer vergleichsweise hohen Amplitude gleichzeitig F1 darstellt. Es liegt also eine Vokalqualität in der Region /o, /å vor. Man kann hier gewissermaßen eine Analogie zu Sopranistinnen erkennen, die die Möglichkeit haben, ihren F1 möglichst auf den Grundton zu legen, wodurch der Klang an Klangfülle gewinnt (vgl. HEIKE und DÜNNWALD 2003).



Diag. 13: Fernfeldkurve mit Teiltonspektrum c1-Geige

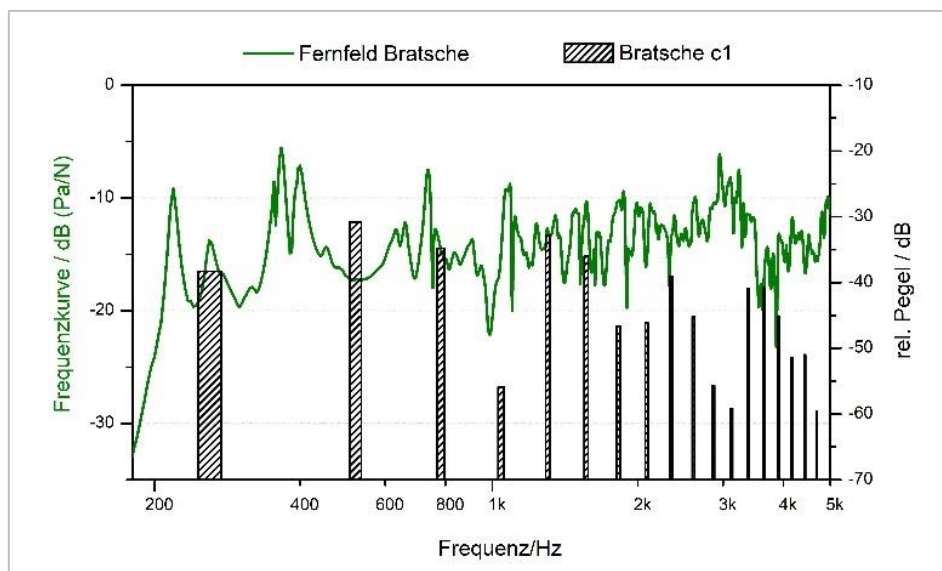
## 4.1.2. Tonleiter Bratsche



Diag. 14: Position Töne c-f2 Bratsche im Vokaldiagramm

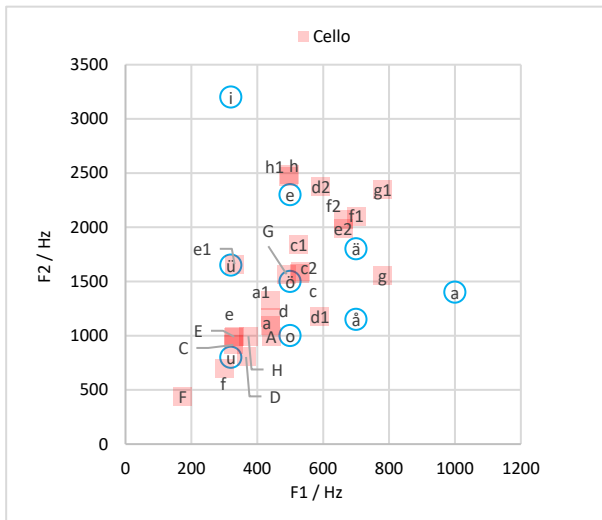
Die Verteilung der Bratschentöne innerhalb des Vokaldreieckes ist wenig gestreut. Fast alle Töne liegen im Bereich /u, /ä und /ü. Für die Noten e2 und d2 hätte F2 auch einem Teilton höherer Ordnung zugeschrieben werden können, die Tendenz bleibt jedoch offensichtlich. Der Vergleich des Vokaldiagrammes (Diag. 14) und der Frequenzkurve der Bratsche (Diag. 15) lässt, ausgehend von der Hohlraumresonanz um 220 Hz über die Hauptresonanzen um 380 Hz bis hin zu den höheren Plattenresonanzen, auch formantbildende Resonanzgebiete der Bratsche erkennen. Bei dem Ton c1 treffen die ersten vier Teiltöne in eine

vergleichsweise resonanzarme Zone, erst der 5. Teilton bei ca. 1300 Hz scheint durch Resonanz begünstigt. Dass ausgerechnet um 3500 Hz die Teiltöne entgegen der Frequenzkurve stark ausgeprägt sind, wirft Fragen auf. Sicherlich sollten für präzisere Interpretationen der Messungen, diese unter denselben Voraussetzungen stattfinden (z.B. reflexionsarmer Raum). Erneute Untersuchungen hätten den Rahmen dieser Arbeit gesprengt.



Diag. 15: Fernfeldkurve und Teiltonspektrum c1-Bratsche

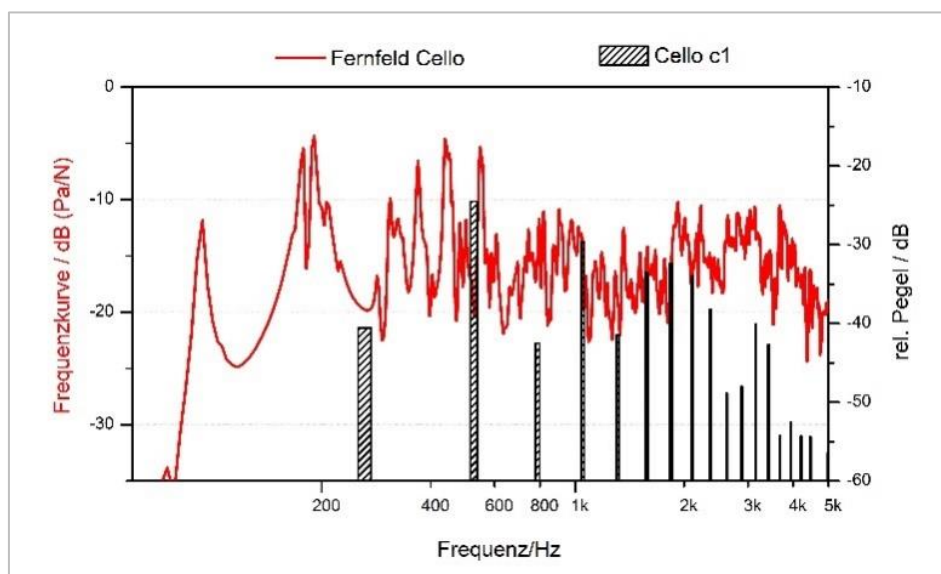
### 4.1.3. Tonleiter Cello



Diag. 16: Position Töne C-f2 Cello im Vokaldiagramm

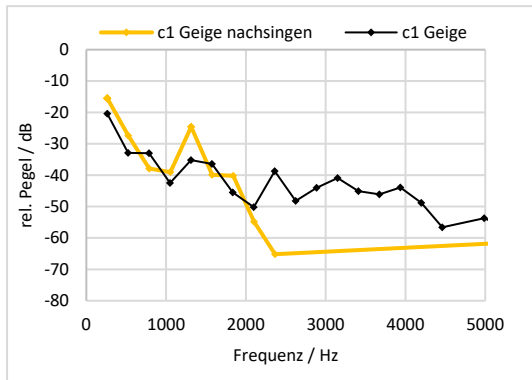
Die tiefen Töne des Cellos sind stark durch dessen Resonanzen bei 94 Hz (Hohlraumresonanz) und um 190 Hz hin zu einem /u-Charakter geprägt (Diag. 16). Generell ist es fragwürdig, ob es hier wirklich sinnvoll ist, die Regel „F1 zwingend >300 Hz“ festzulegen. Da z. B. bei der Note F (87 Hz) der zweite Teilton bei 174 Hz sehr stark durch eine Resonanz des Instrumentes an dieser Stelle hervortritt, wurde hier die Regel  $F1 > 300 \text{ Hz}$  missachtet, sodass sich die Positionierung im Vokaldiagramm außerhalb des Vokaldreieckes befindet. Durch den

großen Tonumfang des Cellos wird auch ein weitgefächerter Bereich innerhalb des Vokaldreieckes abgedeckt. Dem Cello müsste so gesehen eine vielfältigere Klangfarbenpalette (Vokalqualitäten) als den anderen beiden Instrumenten zugestanden werden. An dieser Stelle Verallgemeinerungen aufzustellen, wird jedoch nicht möglich sein, zumal es sich auch nur um die Untersuchung jeweils eines Instrumentes jeden Typus‘ handelt. Einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Einzeltonspektrum und der Frequenzkurve festzustellen fällt schwer. In der Amplitudenveränderung des Grundtons, hin zum ersten Teilton des Einzeltonspektrums, scheint ein offensichtlicher Zusammenhang zum Resonanzprofil des Cellos sichtbar zu werden. (Diag. 17)

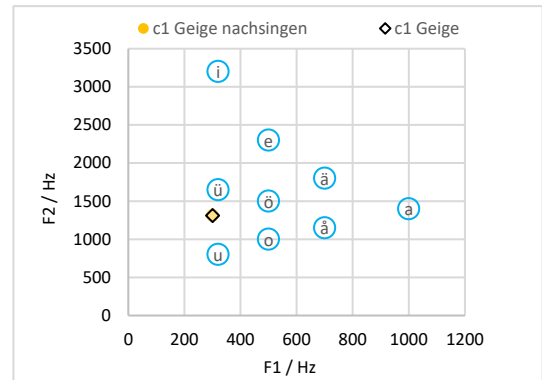


Diag. 17: Fernfeldkurve und Teiltonspektrum c1-Cello

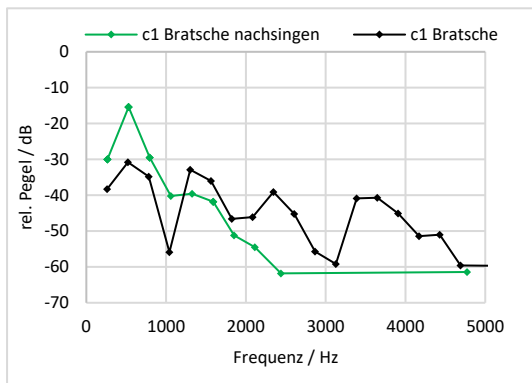
## 4.2. Analyse der nachgesungenen Töne



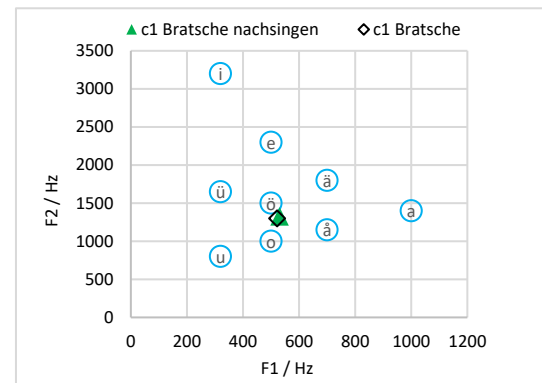
Diag. 18: Einzeltonspektrum c1-Nachsingen Geige



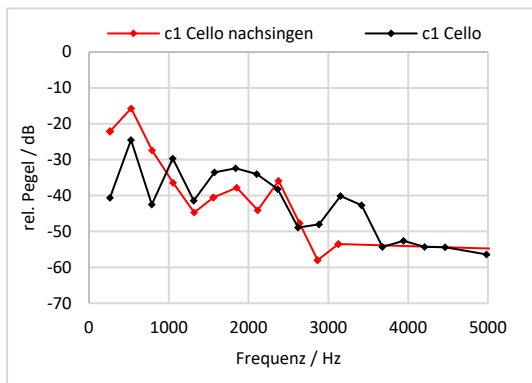
Diag. 19: Position c1-Nachsingen Geige im Vokaldiagramm



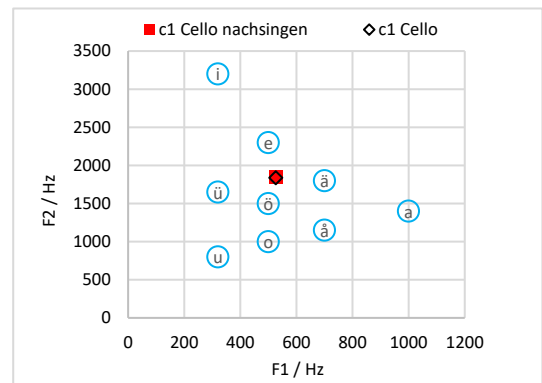
Diag. 20: Einzeltonspektrum c1-Nachsingen Bratsche



Diag. 21: Position c1-Nachsingen Bratsche im Vokaldiagramm



Diag. 22: Einzeltonspektrum c1-Nachsingen Cello



Diag. 23: Position c1-Nachsingen Cello im Vokaldiagramm

Wie man in den Diagrammen gut erkennen kann, war es möglich den Klang der Stimme so zu formen, dass zumindest die ersten beiden Hauptformanten an nahezu der gleichen Position von F1 und F2 der Instrumentenklänge anzusiedeln sind. Da diese Spektren jeweils die Ausprägung der einzelnen Teiltöne widerspiegeln, ist es auch nicht verwunderlich, dass die Frequenzlagen nahezu identisch sind. Kleine Abweichungen sind vor allem intonationsbedingt. Die Abweichung beim Bratschentone beträgt 2 Hz.

### 4.3. Analyse der Klangunterschiede Instrument – Stimme

Der direkte Hörvergleich der gespielten und nachgesungenen Töne ließ natürlich klar erkennen, ob es sich um das Instrument oder den nachgesungenen Ton handelt. Mit VVV lässt sich eine Hauptursache sehr gut nachvollziehen (Abb. 11; 12). Man erkennt, dass der Frequenzbereich oberhalb von 2000 Hz beim Klang der Instrumente viel flächig-breitbandiger ausgeprägt ist, also ein geringerer Amplitudenabfall der höheren Teiltöne vorliegt. Mit einem Filter, der sich interaktiv betätigen lässt, kann man in VVV beliebig viele Frequenzbereiche herausfiltern und unmittelbar den Unterschied wahrnehmen. Ganz deutlich hört man die Gemeinsamkeiten des Instrumentenklanges und des nachgesungenen Tones, wenn man die Frequenzen oberhalb von 2500 Hz ausblendet.

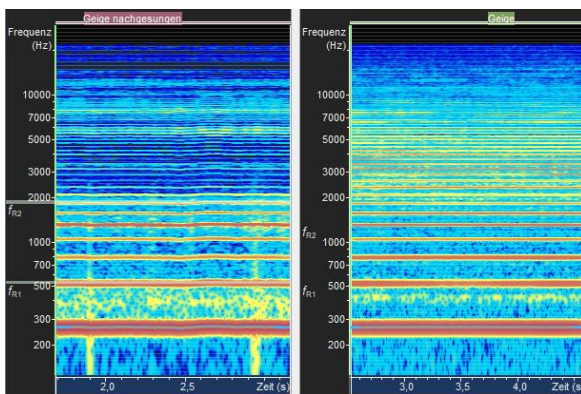


Abb. 11: Langzeitspektrum VVV: links Stimme; rechts Geige (c1)

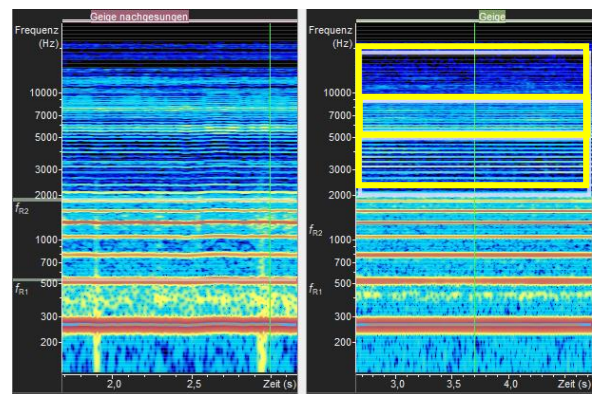


Abb. 12: Langzeitspektrum VVV: links Stimme; rechts Geige oberhalb von 2500 Hz gefilterter (gelbe Markierung)

### 4.4. Diskussion der Ergebnisse

Anhand der durchgeführten Untersuchungen ließ sich gut erkennen, wie die einzelnen Instrumente durch ihr Resonanzprofil im Klangbild geprägt sind. Während bei der Stimme die Klangfarbe ständig mit Hilfe des beweglichen Vokaltraktes verändert werden kann, ist dem Instrumentenkörper der Streichinstrumente durch seine Konstruktion nur eine – nicht ohne weiteres veränderbare – Stellung gewährt. Da jedoch das Resonanzprofil einige sich stark abhebende Hauptresonanzen aufweist, ist im Streichinstrumentenklang eine von Ton zu Ton wechselnde Vokalqualität und damit auch Klangfarbe möglich. Wenn in der Betrachtung einer Frequenzkurve ein Zusammenhang zur Vokalqualität einzelner Töne eher schwerfällt, so ist die Darstellung der Haupt-Formanten von Einzeltönen innerhalb eines Vokaldiagramms sehr hilfreich. Ist man bei der eindimensionalen Betrachtung eines Frequenzkurvenverlaufs möglicherweise in der Lage, durch die Frequenzlage der Grundtöne einen /u, /o oder /å - Charakter zu vermuten, gelingt mit Hilfe des Vokaldiagramms durch die Bestimmung von F2 eine weitere Differenzierung. Eine steigende Frequenz von F2 bedeutet dabei die Veränderung von einem Hinterzungenvokal zu einem Vorderzungenvokal, also z. B. vom /u zum /i bzw. /ü. Einen Bezug zur Ausprägung (Amplitude) der Resonanz, wie sie in der Frequenzkurve zu sehen ist, fehlt hier jedoch. Das Nachsingen einzelner Töne lässt die Bedeutsamkeit der Lage

von F2 unmittelbar erkennen; die mit VVV gegebenen Möglichkeiten sind dabei sehr hilfreich und zu empfehlen. Wie oben bereits erwähnt, ist die Wahl der formantbildenden Resonanzen F1 und F2 nicht immer eindeutig zu klären, so können eindeutige oder ambivalente Vokalqualitäten auftreten. (vgl. MORES 2016)

Auch wenn ein abschließendes Urteil nicht angebracht ist – zumal es sich um einmalig durchgeführte Untersuchungen handelt – können die Ergebnisse einige Erkenntnisse aus der Literatur (MEYER; MORES; DÜNNWALD) widerspiegeln. Die Resonanzeigenschaften auch einer Bratsche und eines Cellos wie oben beschrieben in Form von Vokalqualitäten aus einem Vokaldiagramm herauszulesen, wurde nach dem Kenntnisstand des Autors noch nicht vorgenommen. Auf diese Weise konnten wesentliche Unterschiede der Resonanzeigenschaften von Geige, Bratsche und Cello verdeutlicht werden.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Frage nach einer bestehenden Verwandtschaft zwischen der Klangbildung von Streichinstrumenten und der menschlichen Stimme stellte die Ausgangslage der vorliegenden Arbeit dar. Auch wenn sich diese Frage nicht nur in Bezug auf Streichinstrumente stellt, sollte sie dennoch auf diese eingegrenzt werden. Es wurde nach Ursachen gesucht, die eine solche Verwandtschaft objektiv belegen. Um überhaupt mögliche Gemeinsamkeiten beider nachweisen zu können, wurde die Tonerzeugung sowie die Resonanz und Filterwirkung zunächst auf der Basis von Literaturrecherche behandelt. Einige bereits existierende Studien gaben Anlass dazu, sich bei den eigenen Untersuchungen auf die Bildung der Formanten in Streichinstrumentenklängen zu konzentrieren, da dies eine Gemeinsamkeit mit der menschlichen Stimme vor allem im Gesang darstellt. Dabei wurde ein Verständnis dafür entwickelt, Vokale nicht nur als Information der Sprache zu verstehen, sondern ihren spezifischen Klang der messbaren bestimmten Lage der ersten beiden Hauptformanten zuzuordnen. So können in der Kommunikation über Klangfarben, möglicherweise auch durch das Erstellen eines persönlichen Vokaldreiecks, die eigenen Vorstellungen einer bestimmten Vokalqualität objektiv mit Hilfe eines gemittelten Vokaldreiecks abgeglichen werden.

Die vorgenommenen Untersuchungen, Instrumentalklänge in einem Vokaldiagramm darzustellen und auf ihre Vokalqualität hin zu untersuchen, stützen sich maßgeblich auf Arbeiten von MORES. Da sich das softwarebasierte automatisierte Auslesen der Formanten als für diese Arbeit zu komplex erwies, wurde versucht, dies durch optisches Herauslesen aus den Einzeltonspektren umzusetzen. Dies geschah auf der Basis von z.T. selbst definierten Bedingungen, weshalb zu einer späteren Überprüfung die Einzeltonspektren im Anhang vorzufinden sind.

Im Allgemeinen konnte in der Arbeit nachvollzogen werden, dass Streichinstrumente durchaus formantähnliche Klänge erzeugen, sie also Vokalqualitäten enthalten können. Die Darstellung der Einzeltöne in einem Vokaldiagramm ließ erkennen, dass das Cello wohl die größte Bandbreite unterschiedlicher Vokalqualitäten innerhalb des Vokaldreiecks bereithält, was u.a. seinem großen Tonumfang geschuldet ist. Wenn man die Klangfarbenvielfalt als Hauptargument für die Ähnlichkeit zur menschlichen Stimme nimmt, dürfte man also dem Cello die nächste Verwandtschaft zusprechen. Nach Ansicht des Autors gilt es jedoch zu bedenken, dass es zum Einen sehr unterschiedliche Stimmen gibt und zum Anderen die Tonlage eine wichtige Rolle spielt. Die im Sopranregister gespielten Töne auf dem Cello bieten nicht die Klangfarbenvielfalt wie dieselben Töne, wenn sie auf der Geige hervorgebracht werden. In ihrem Gesamtklang lassen sich die Streichinstrumente natürlich noch deutlich von der Stimme unterscheiden. Ein auffälliger Aspekt dafür ist u.a. der flächig-breitbandig ausgeprägte Obertonanteil der Streichinstrumente.

Mit der Software VVV wurde ein Programm entdeckt, das es ermöglicht, nahezu spielerisch die Zusammenhänge zwischen Klangphysik und Wahrnehmung von Musik zu erforschen. Anhand eines integrierten Vokaldiagramms und interaktiven Filtern eignet es sich, das Bewusstsein für Resonanzen, nicht nur des Vokaltraktes, und die Existenz von Obertönen zu sensibilisieren. Das „Ansingen“ des Spektrums einzelner Noten gibt den



Sänger-/KlangforscherInnen unmittelbar eine Idee der Klangfarbe durch die spezifische Stellung des Vokaltraktes und kann so den Umkehrbeweis liefern, dass die menschliche Stimme mit dem Klang von Streichinstrumenten verwandt ist.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte leider nur die Bedeutung von F1 und F2 ansatzweise aufgearbeitet werden, sodass F3 und F4 ganz außenvor gelassen worden sind. Weitergehende Untersuchungen, die auch die höheren Formanten mit in Betracht ziehen, wie sie auch schon von TAI et. al 2012 vorgenommen wurden, wären sehr interessant, zumal sich ihre Lage im Bereich des „Sängerformanten“ befindet. Da das Vokaldiagramm lediglich eine Aussage darüber trifft, dass und an welcher Position Formanten vorhanden sind, und nicht wie gut diese ausgeprägt sind, wäre es möglicherweise noch hilfreich, die einzelnen Pegel oder ihr Pegelverhältnis durch einen Farb- und oder Form-Code mit zu dokumentieren. Dies könnte bei einem Vergleich innerhalb der gleichen Instrumentengruppe interessant sein.

Im Zusammenhang mit der Chorphonetik hat SAUS, Obertonsänger und Mitentwickler der Software VVV, ein Gesangsphonetik-Diagramm entwickelt, worin alle singbaren Vokalnancen in Abhängigkeit von der gesungenen Tonhöhe abzulesen sind. Dies gelingt mit Hilfe einer Resonanzmatrix, die einmal von der x-Achse und einmal von der y-Achse ausgehend, die Schnittpunkte der grundtonabhängigen Obertonreihe markiert. (SAUS 2017) Jeder dieser Schnittpunkte stellt also eine Position dar, in der F1 und F2 gleichzeitig auf Resonanz stoßen können. Die Idee dahinter besteht darin, dass der Singende diese Schnittpunkte bewusst durch die Stellung des Vokaltraktes ansteuert um den Klang mühelos durch die Resonanzeigenschaften des Vokaltraktes zu verstärken.

Möglicherweise beruht die Entwicklung der heute üblichen Form der Streichinstrumente bereits auf ähnlichen Überlegungen, nämlich das Konstrukt Korpus – im Sinne eines Vokaltraktes – so zu formen, dass möglichst vielen Tönen in einer bestimmten Stimmung die Möglichkeit gegeben wird vokalähnliche Resonanzstrukturen auszubilden. MEYER schreibt zur Geige: „Die Anzahl der Töne innerhalb des vollen chromatischen Umfangs, bei denen Formanten auftreten, ist deshalb ein typisches Qualitätskriterium für das Instrument, weil durch die vokalartige Färbung der gesungliche Klangcharakter unterstützt wird.“ (vgl. MEYER 2015, S.73) Da nun, wie auch in der vorliegenden Arbeit nachgewiesen, die Lage der Haupt-Formanten der Vokale sehr präzise bestimmt werden kann, wären dahingehende Untersuchungen wertvoll, genauer zu analysieren welche Vokalqualitäten bei welchen Tönen überhaupt möglich sind. Weiterhin wäre es interessant, ob man durch eine bewusste Verschiebung der Hauptresonanzen des Instrumentes bestimmte Vokalqualitäten begünstigen kann.

## **Danksagung**

Ein erster herzlicher Dank gilt Herrn Professor Ziegenhals, durch dessen kontinuierliche Unterstützung die Umsetzung dieser Arbeit erst möglich geworden ist.

Weiterhin möchte ich mich bei meiner Partnerin Angela Hünig bedanken, die nicht nur durch das Korrekturlesen der Texte behilflich war, sondern stets meine Arbeit unterstützt und mit motivierendem Interesse begleitet hat.

Die Präsenz von Luca Jost am Studiengang hier in Markneukirchen stellt eine große Bereicherung aller wissenschaftlich motivierten Studenten und Studentinnen dar, da er stets mit Rat und Tat, auch mir zur Seite stand. Danke Luca!

Ein großer Dank gilt auch allen, die mir beim Korrekturlesen der Texte sehr geholfen haben. Weiterhin danke ich meinen Kommilitoninnen und Kommilitonen, für den fachlichen und persönlichen Austausch.

Ein besonderer Dank gilt den Entwicklern der fantastischen Software VoceVista Video Pro, die in der Lage ist durch intuitive Klangexperimente die Bedeutung von Resonanz und Obertönen wahrnehmen zu lassen.

Letztendlich möchte ich mich bei allen AutorInnen bedanken, auf deren Arbeit die Untersuchungen meiner Arbeit maßgeblich fußen.

## Literaturverzeichnis

- Askenfelt, A. (1991):** Voices and strings: Close cousins or not? In: Johan Sundberg, Lennart Nord und Rolf Carlson (Hg.): Music, Language, Speech and Brain. Proceedings of an International Symposium at the Wenner-Gren Center, Stockholm, 5-8 September 1990. London, s.l.: Macmillan Education UK (Wenner-Gren Center International Symposium Series), S. 243–256.
- Hall, Donald E.; Goebel, Johannes (Hg.) (1997):** Musikalische Akustik. Ein Handbuch. 2. Aufl. Mainz: Schott (Veröffentlichung des Zentrums für Kunst und Medientechnologie Karlsruhe, Institut für Musik und Akustik).
- Heike, Georg; Dünnwald, Heinrich (2003):** Neuere Klanguntersuchungen an Geigen und ihre Beziehung zum Gesang. In: *Perspektiven und Methoden einer systemischen Musikwissenschaft*, S. 235.
- Isserlis, Steven (2011):** The cello's perfect partner: the human voice. In: *The Guardian*, 27.10.2011. Online verfügbar unter <https://www.theguardian.com/music/2011/oct/27/steven-isserlis-voice-and-cello-series>, zuletzt geprüft am 02.04.2021.
- Jansson, Erik (1966):** Analogies between bowed string instruments and the human voice, source-filter methods. In: *Quarterly Progress and Status Report* 7 (3), S. 4–6.
- Mayer, Jörg (2017):** Phonetische Analysen mit Praat. Ein Handbuch für Ein- und Umsteiger. Online verfügbar unter <http://praatpfanne.lingphon.net/>.
- Meinel, Eberhard (2014):** Akustik der Zupf- und Streichinstrumente. Lehrbrief. Fachhochschule für Musikinstrumentenbau, Markneukirchen
- Meyer, Jürgen (2015):** Akustik und musikalische Aufführungspraxis. Leitfaden für Akustiker, Tonmeister, Musiker, Instrumentenbauer, und Architekten. 6., erweiterte Auflage. Bergkirchen: PPVMedien Edition Bochinsky (Fachbuchreihe Das Musikinstrument, Band 24).
- Mores, Robert (2015):** Human Voice – a Sparse, Meaningful and Capable Representation of Sounds. Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/publication/268188108\\_Human\\_Voice\\_-\\_a\\_Sparse\\_Meaningful\\_and\\_Capable\\_Representation\\_of\\_Sounds](https://www.researchgate.net/publication/268188108_Human_Voice_-_a_Sparse_Meaningful_and_Capable_Representation_of_Sounds).
- Mores, Robert (2016):** Vowel Quality in Violin Sounds—A Timbre Analysis of Italian Masterpieces. In: Albrecht Schneider (Hg.): Studies in Musical Acoustics and Psychoacoustics, Bd. 4. Cham: Springer International Publishing (Current Research in Systematic Musicology, v.4), S. 223–245.
- Mores, Robert (2019):** Further empirical data for torsion on bowed strings. In: *PloS one* 14 (2), e0211217. DOI: 10.1371/journal.pone.0211217.
- Müller, Stella; Mores, Robert (2008):** Vokale in Klängen - Eine LPC-basierte Extraktion der Vokalqualität zur Abbildung von Violinklängen im Vokaldiagramm. In: *DAGA*, 2008.
- Saus, Wolfgang (2017):** Gesangsphonetik - Ein neuer Weg zum optimalen Vokal. In: *VOX HUMANA* (13.4), S. 17–21. Online verfügbar unter [https://www.oberton.org/wp-content/uploads/Vox-Humana-01-15-Wolfgang-Saus\\_150115.pdf](https://www.oberton.org/wp-content/uploads/Vox-Humana-01-15-Wolfgang-Saus_150115.pdf), zuletzt geprüft am 26.06.2021.
- Schubert, Emery (2019):** Which Nonvocal Musical Instrument Sounds Like the Human Voice? An Empirical Investigation. In: *Empirical Studies of the Arts* 37 (1), S. 92–103. DOI: 10.1177/0276237418763657.
- Schubert, Emery; Wolfe, Joe (2016):** Voicelikeness of musical instruments: A literature review of acoustical, psychological and expressiveness perspectives. In: *Musicae Scientiae* 20 (2), S. 248–262. DOI: 10.1177/1029864916631393.
- Sundberg, Johan (1977):** The acoustics of the singing voice. In: *Scientific American* 236 (3), 82–4, 86, 88–91. DOI: 10.1038/scientificamerican0377-82.
- Tai, Hwan-Ching; Chung, Dai-Ting (2012):** Stradivari Violins Exhibit Formant Frequencies Resembling Vowels Produced by Females. In: *Savart Journal* 1 (2).

**Tai, Hwan-Ching; Shen, Yen-Ping; Lin, Jer-Horng; Chung, Dai-Ting (2018):** Acoustic evolution of old Italian violins from Amati to Stradivari. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115 (23), S. 5926–5931. DOI: 10.1073/pnas.1800666115.

**Woodhouse, Jim (2005):** On the "Bridge Hill" of the Violin. In: *Acta Acustica united with asustica*.

**Ziegenhals, Gunter; Voigtsberger, Kersten (1996):** Der Einfluß der Stegform auf den Klang der Streichinstrumente. Zwota

**Ziegenhals, Gunter (2017a):** Messtechnik. Skript zur Vorlesung. Fachhochschule für Musikinstrumentenbau, Markneukirchen

**Ziegenhals, Gunter (2017b):** Musikalische Akustik 1. Skript zur Vorlesung. Fachhochschule für Musikinstrumentenbau, Markneukirchen

**Zinkhahn, Florian (2021):** Untersuchungen am Geigensteg zum physikalisch-akustisch- und klanglichen Einfluss der Stegfußfesselstärke. Projektarbeit. Fachhochschule für Musikinstrumentenbau, Markneukirchen

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b>	Durch den Bogen generierte Sägezahnschwingung (stick-slip-Phasen) und daraus resultierende Geschwindigkeitsänderung in Abhängigkeit der Position des Bogens auf der Saite ASKENFELD (1991).....	10
<b>Abb. 2:</b>	Abhängigkeit des Bogendruckes von der Kontaktstelle bei konstanter Bogengeschwindigkeit.....	11
<b>Abb. 3:</b>	Seitenansicht Resonanzräume: Kehlkopf, Rachen, Mundhöhle, Nasenhöhle <a href="http://www.fb10.uni-bremen.de/khwagner/phonetik/kapitel2.aspx">http://www.fb10.uni-bremen.de/khwagner/phonetik/kapitel2.aspx</a> letzter Zugriff: 01.07.2021.....	12
<b>Abb. 4:</b>	Kehlkopf aus Sicht des Vokaltraktes (von oben) <a href="https://de.wikipedia.org/wiki/Kehlkopf">https://de.wikipedia.org/wiki/Kehlkopf</a> letzter Zugriff: 01.07.2021.....	12
<b>Abb. 5:</b>	Querschnitt Stimmlippen: Schwingungszyklus – geschlossen- offen- Phasen- <a href="https://de.wikipedia.org/wiki/Glottis">https://de.wikipedia.org/wiki/Glottis</a> letzter Zugriff: 01.07.2021.....	13
<b>Abb. 6:</b>	Vokaltrapez-Verständnishilfe durch Zungenlage <a href="http://www.sprachlog.de/2009/03/02/ach-ich-und-die-kirschen-teil-1/">http://www.sprachlog.de/2009/03/02/ach-ich-und-die-kirschen-teil-1/</a> letzter Zugriff: 01.07.2021.....	14
<b>Abb. 7:</b>	Vokaltrapez: Symbolerklärung ist der Tabelle 2 in Kapitel 3.5 zu entnehmen <a href="https://de.wikipedia.org/wiki/Vokaltrapez">https://de.wikipedia.org/wiki/Vokaltrapez</a> letzter Zugriff: 01.07.2021.....	15
<b>Abb. 8:</b>	Tonumfang Stimme – Streichinstrumente Ausschnitt aus <a href="https://www.heuchelberger-alphornbrass.de/brass-n/tonumfang-von-instrumenten">https://www.heuchelberger-alphornbrass.de/brass-n/tonumfang-von-instrumenten</a> letzter Zugriff: 01.07.2021.....	17
<b>Abb. 9:</b>	Analyse der Formanten mit PRAAT.....	21
<b>Abb. 10:</b>	„Ansingen“ des Tones c1 des Cellos: oberes Fenster links rot=Einzeltonspektrum Cello; unteres Fenster links bunt=Spektrum des nachgesungenen Tones; rechts oben interaktives Vokaldiagramm mit „Formantlinealen“; rechts unten Datei- u. Markierungsmanager.....	26
<b>Abb. 11:</b>	Langzeitspektrum VVV: links Stimme; rechts Geige (c1).....	32
<b>Abb. 12:</b>	Langzeitspektrum VVV: links Stimme; rechts Geige oberhalb 2500 Hz gefilterter (gelbe Markierung).....	32

## Tabellenverzeichnis

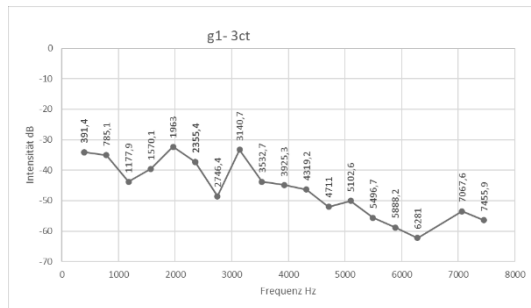
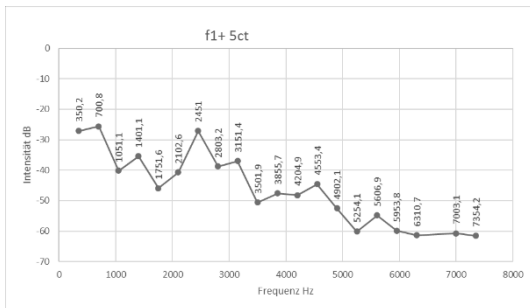
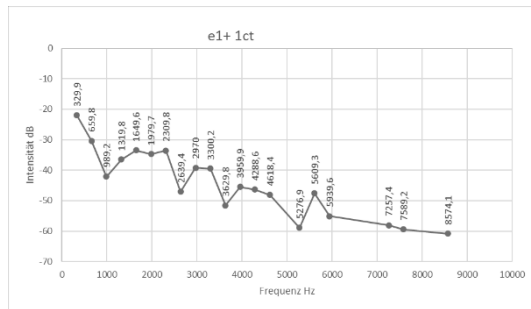
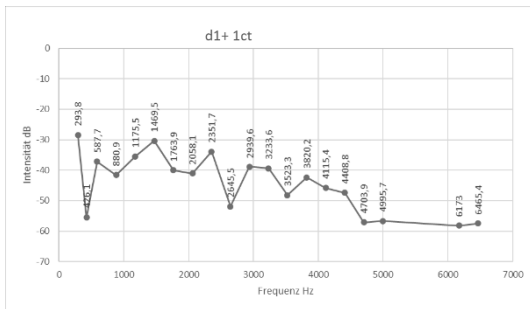
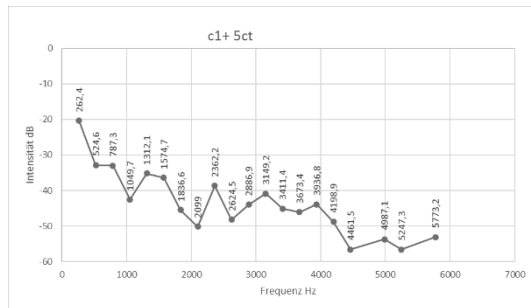
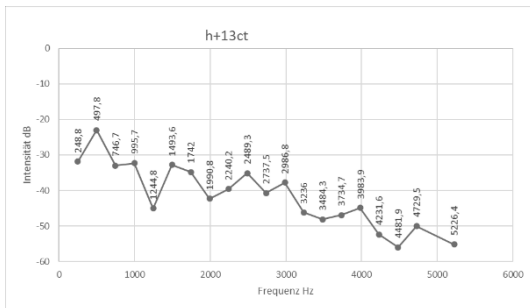
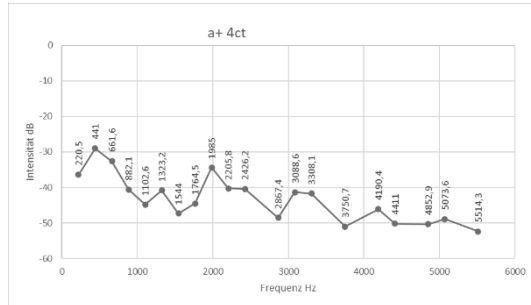
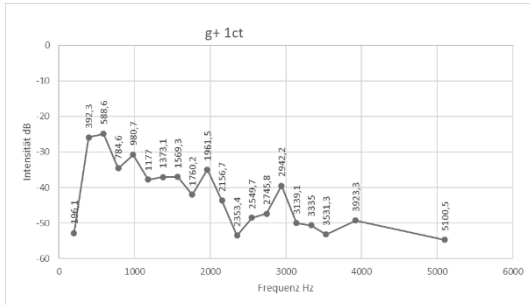
<b>Tabelle 1:</b>	Gegenüberstellung Streichinstrument - Menschliche Stimme Inhalte an SCHUBERT und WOLF (2016) angelehnt und ergänzt.....	16
<b>Tabelle 2:</b>	gemittelte Formantlage der Vokale <a href="https://de.wikipedia.org/wiki/Formant">https://de.wikipedia.org/wiki/Formant</a> letzter Zugriff: 01.07.2021.....	23

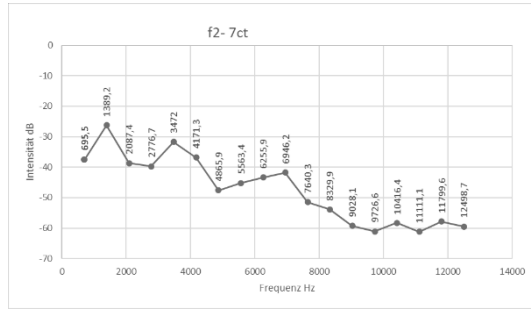
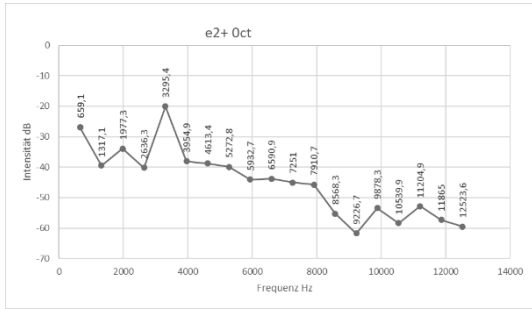
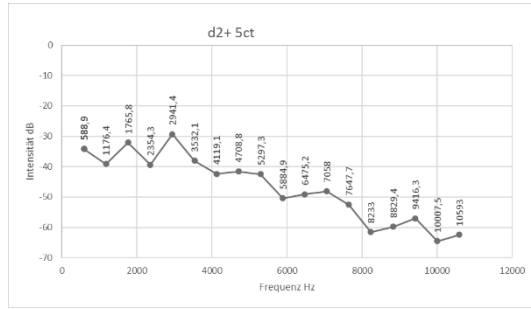
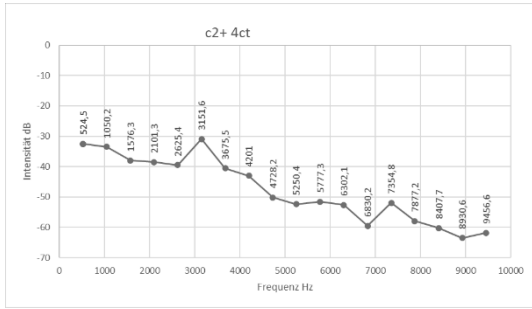
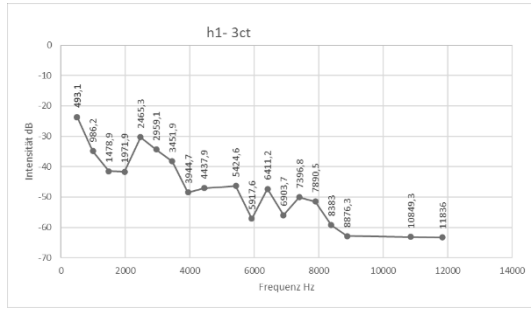
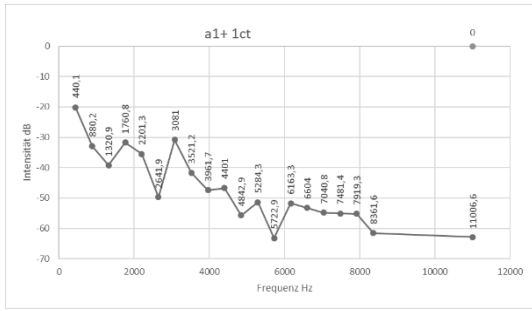
## Diagrammverzeichnis

<b>Diag. 1:</b>	Vokaldreieck Vokal-Formantzentren.....	14
<b>Diag. 2:</b>	Mit PRAAT analysierte männliche und weibliche Vokale im Vergleich mit dem gemittelten Vokaldreieck.....	21
<b>Diag. 3:</b>	Einzeltonspektrum h-Cello (248 Hz) .....	23
<b>Diag. 4:</b>	Position h-Cello (248 Hz) im Vokaldreieck.....	23
<b>Diag. 5:</b>	Einzeltonspektrum c1-Geige (262 Hz) .....	24
<b>Diag. 6:</b>	Position c1-Geige (262 Hz) im Vokaldiagramm.....	24
<b>Diag. 7:</b>	Einzeltonspektrum c1-Bratsche (260 Hz).....	24
<b>Diag. 8:</b>	Position c1-Bratsche (260 Hz) im Vokaldiagramm.....	24
<b>Diag. 9:</b>	Einzeltonspektrum c1-Cello (262 Hz) .....	25
<b>Diag. 10:</b>	Position c1-Cello (262 Hz) im Vokaldiagramm.....	25
<b>Diag. 11:</b>	Position der Tonleiter C-Dur Geige, Bratsche Cello (C-f2) im Vokaldiagramm.....	27
<b>Diag. 12:</b>	Position Töne g-f2 Geige im Vokaldiagramm.....	28
<b>Diag. 13:</b>	Fernfeldkurve mit Teiltonspektrum c1-Geige.....	28
<b>Diag. 14:</b>	Position Töne c-f2 Bratsche im Vokaldiagramm.....	29
<b>Diag. 15:</b>	Fernfeldkurve und Teiltonspektrum c1-Bratsche.....	29
<b>Diag. 16:</b>	Position Töne C-f2 Cello im Vokaldiagramm.....	30
<b>Diag. 17:</b>	Fernfeldkurve und Teiltonspektrum c1-Cello.....	30
<b>Diag. 18:</b>	Einzeltonspektrum. c1-Nachsingen Geige.....	31
<b>Diag. 19:</b>	Position c1-Nachsingen Geige im Vokaldiagramm.....	31
<b>Diag. 20:</b>	Einzeltonspektrum c1-Nachsingen Bratsche.....	31
<b>Diag. 21:</b>	Position c1-Nachsingen Bratsche im Vokaldiagramm.....	31
<b>Diag. 22:</b>	Einzeltonspektrum c1-Nachsingen Cello.....	31
<b>Diag. 23:</b>	Position c1-Nachsingen Cello im Vokaldiagramm.....	31

# Anhang

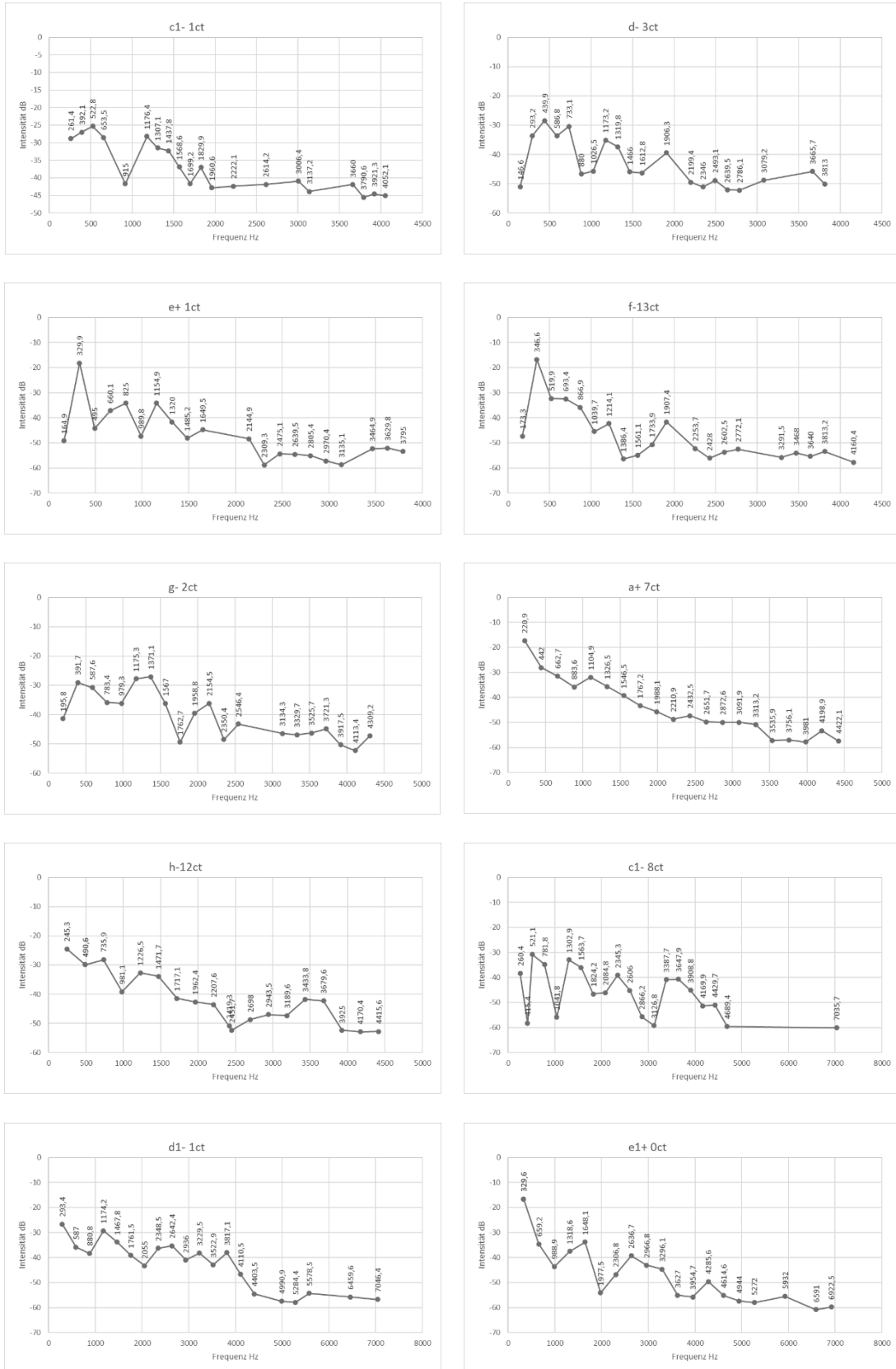
## Einzeltonspektren C-Dur-Tonleiter ab g Geige

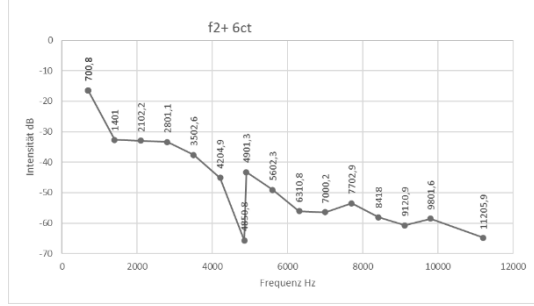
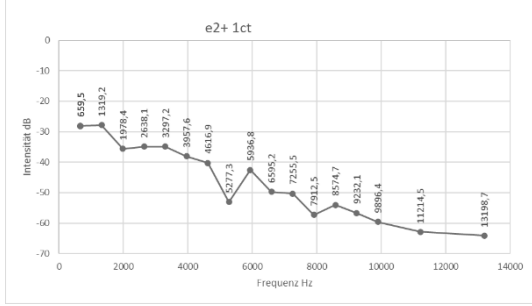
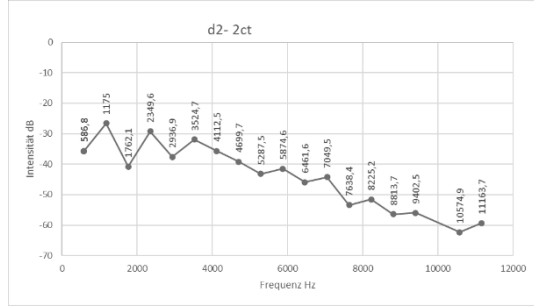
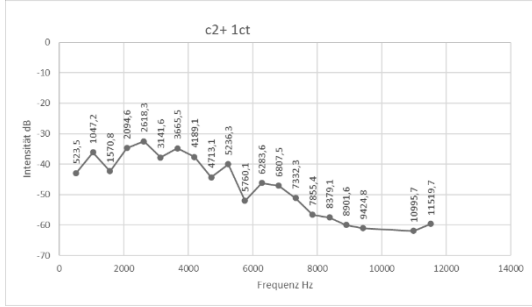
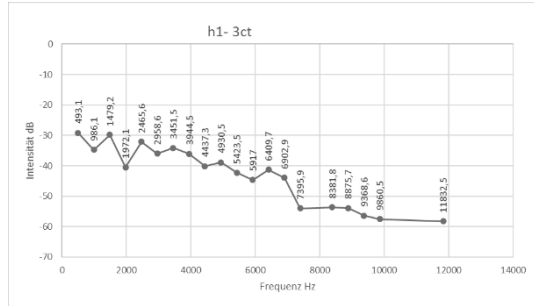
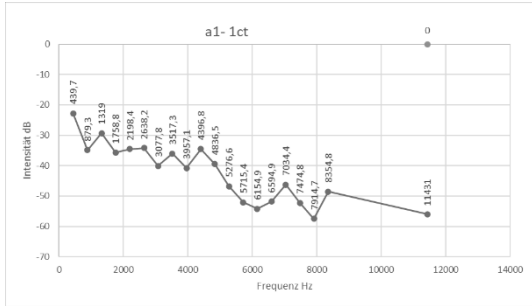
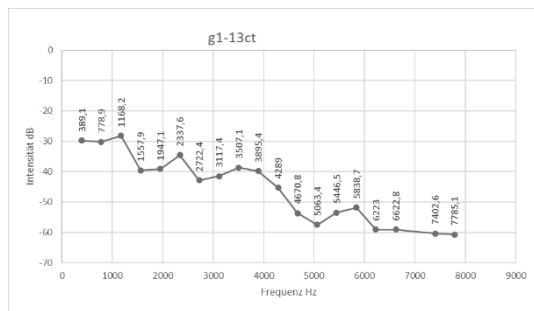
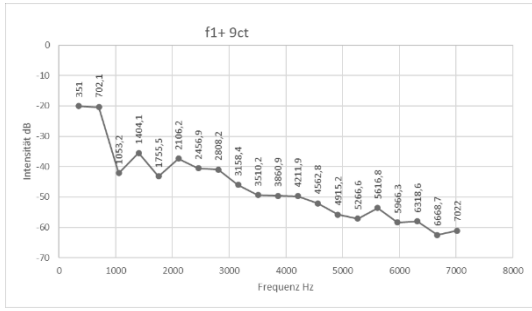




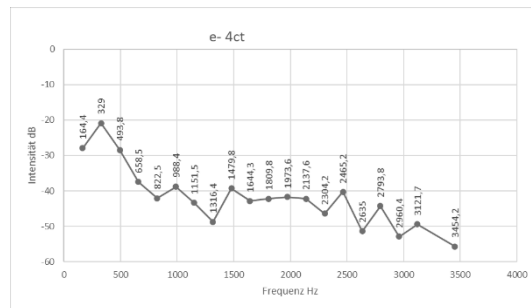
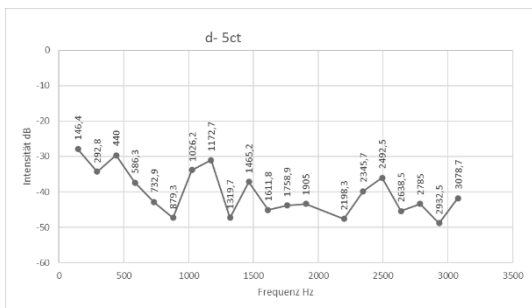
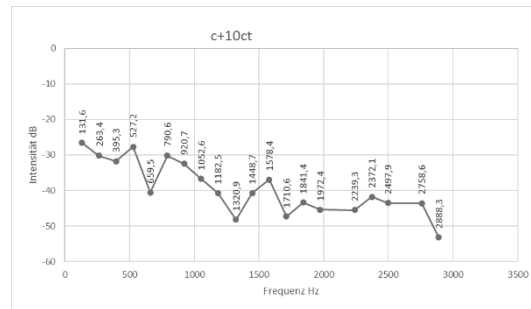
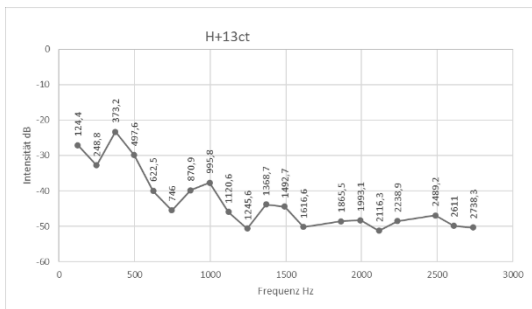
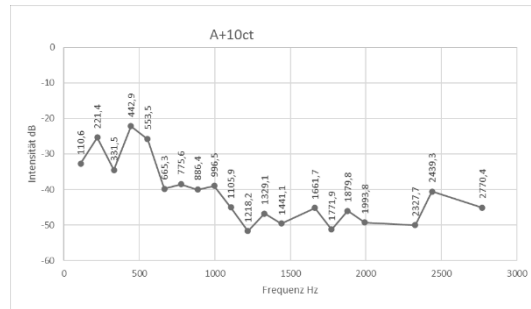
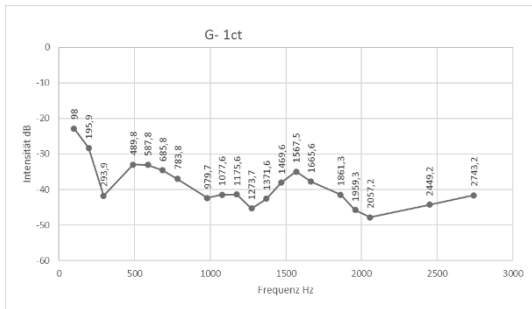
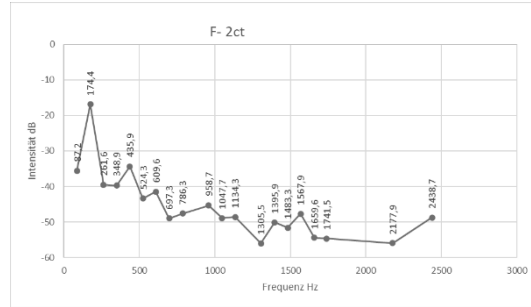
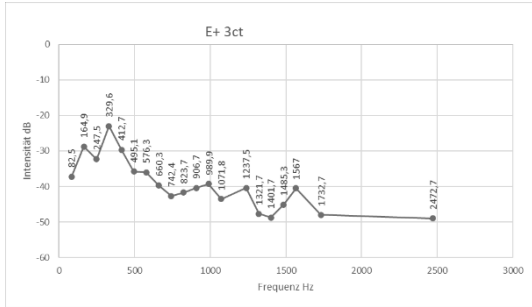
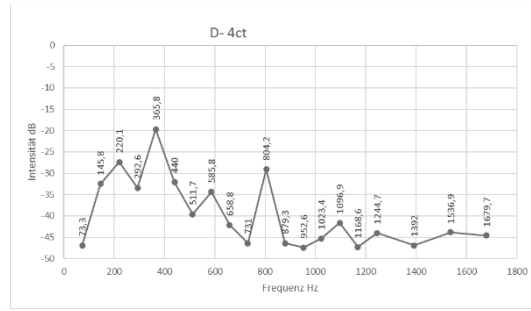
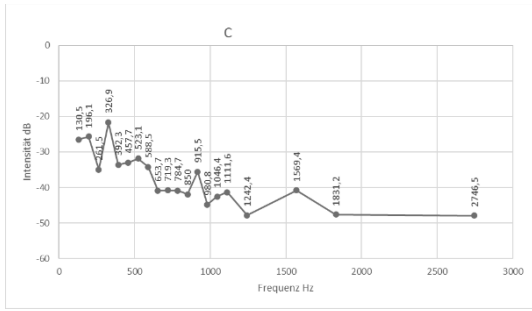


## Einzeltonspektren C-Dur Tonleiter Bratsche

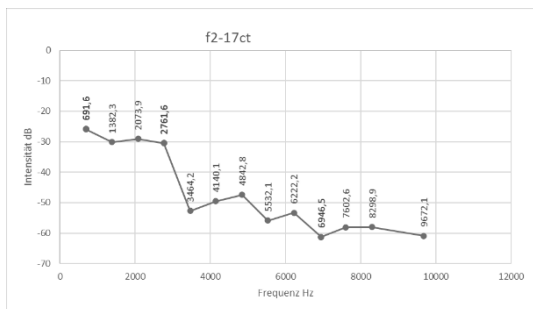
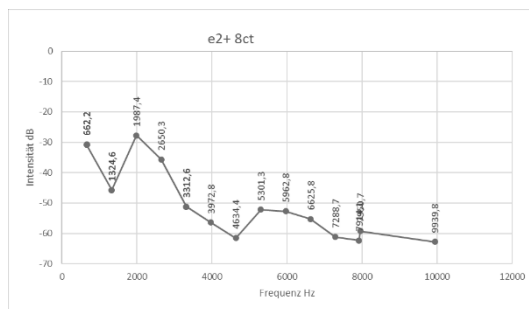
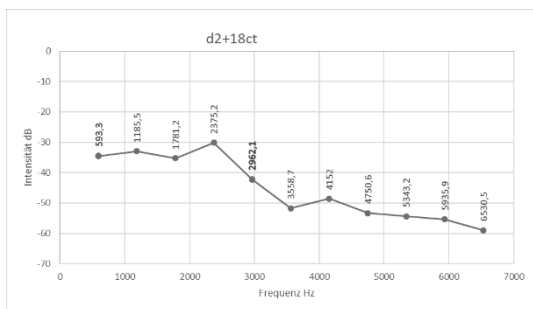
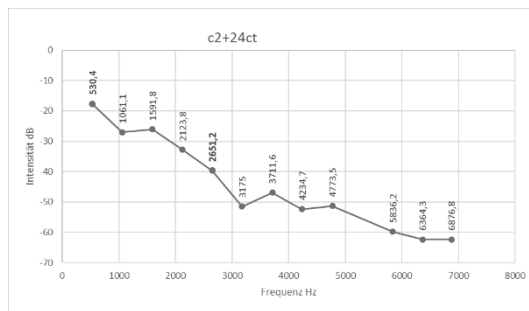
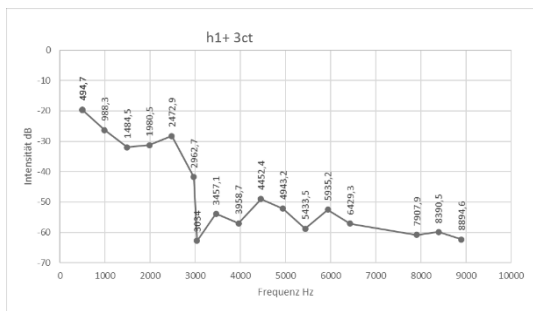




# Einzeltonspektrum C-Dur-Tonleiter Cello







## Übersicht über die optisch ausgewählten Werte für F1 und F2 (F3 / F4)

	Cello						Bratsche					Geige				
	F0	F1	F2	F3	F4		F0	F1	F2	F3	F4	F0	F1	F2	F3	F4
C	65	327	915	1112	1569											
D	73,3	366	804	1096	1567											
E	82,5	330	990	1237	1567											
F	87,2	174	435	958	1567											
G	98	489	1567	1112	1569											
A	110,6	442	996	997	2439											
H	124,4	373	996	1368	1993											
c	131,6	527	1578	1578	2372	261,4	523	1176	1829	3006						
d	146,4	440	1172	1465	2492	146,6	440	733	1906	2496						
e	164,4	329	988	1480	2465	164,9	329	825	1154	1649						
f	173,7	300	694	1562	2432	173,3	347	693	1214	1970						
g	194,9	780	1559	1559	1949	195,8	391	1371	2154	2546	196,1	588	981	1961	2942	
a	219,7	439	1098	1537	1977	220,9	220	1105	2432	4199	220,5	441	1985	1985	3088	
h	248,8	497	2487	3978	4973	245,3	245	735	1226	3434	248,8	497	1493	2489	2987	
c1	263	526	1839	1839	3152	260,4	521	1302	2345	3647	262,4	300	1312	2362	2362	
d1	294,2	590	1177	2059	2944	293,4	293	1174	2642	3229	293,8	300	1470	2351	2940	
e1	331,8	331	1660	3650	4315	329,6	330	1648	2637	4285	329,9	660	1650	2970	3960	
f1	351	701	2104	3157	4557	351	351	1404	2106	2808	350,2	700	1401	2451	4553	
g1	390,5	781	2344	5078	7424	389,1	389	1168	2337	3507	391,4	391	1963	3140	5102	
a1	440,8	440	1321	2203	4403	439,7	439	1319	2638	3517	440,1	440	1760	3081	4403	
h1	494,7	495	2473	1112	1569	493,1	493	1479	2465	3451	493,1	493	2465	5425	6411	
c2	530,4	530	1592	2651	3711	523,5	523	1047	3665	5236	524,5	524	3152	5777	7355	
d2	593,3	593	2375	2962	4152	586,8	587	1175	3525	5875	588,9	589	2941	2941	4708	
e2	662,2	662	1987	3312	5301	659,5	660	1319	3312	5301	659,1	659	3295	9878	11204	
f2	662	662	2073	3312	5301	662	700	2801	4901	7702	662	1389	3472	6946	10416	

## **Selbstständigkeitserklärung**

Zur „Thesis“ mit dem Thema: Klangbildung bei Streichinstrumenten – der menschlichen Stimme verwandt?

Ich Florian Zinkhahn erkläre gegenüber der Fakultät Angewandte Kunst Schneeberg (AKS/WHZ), dass ich die vorliegende Bachelor-Arbeit 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 AK/WHZ noch andernorts) eingereicht und ist auch noch nicht veröffentlicht worden.

Ort/Datum: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_