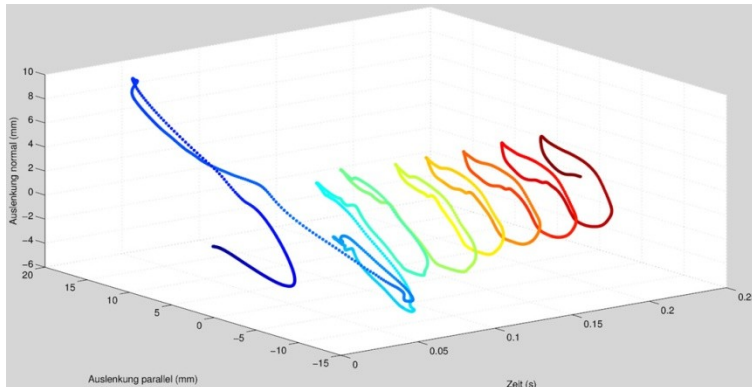


Universität für Musik und darstellende Kunst Wien

Institut für Wiener Klangstil (Musikalische Akustik)

Betreuer:
Mag. art. Helmut Kühnelt



Eine Arbeit von:
Benjamin Zehetner

Saitenschwingungsverhalten am Beispiel des Kontrabasses, Analyse und Fakten

Bachelorarbeit in der Studienrichtung
Instrumental(Gesangs)pädagogik
im Rahmen der Lehrveranstaltung
Seminar für musikalische Akustik 01 (SE)

Inhalt

Einleitung I.....	3
Zusammenfassung und Gliederung der Arbeit II.....	3
Persönliche Motivation und Hintergründe III.....	4
1 Grundlagen zur Saitenschwingung.....	4
1.1 Wellenformen.....	5
1.2 Die gezupfte Saite.....	7
1.2.1 Zupfvorgang und Teilwellen.....	7
1.2.2 Schwingungsbeeinflussende Faktoren.....	8
1.2.3 Schwingungsausbreitung.....	9
1.2.4 Entwicklung der Obertöne eines Klangs.....	9
1.2.5 Das Ausschwingverhalten.....	11
1.3 Die Hüllkurve.....	11
2 Testaufbau und Messmethoden.....	12
2.1 Analyse mit Hilfe von Beschleunigungssensoren.....	13
2.2 Analyse mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera.....	17
2.2.1 Ausbreitung der Teilwellen.....	18
2.2.2 Schwingungsübertragung auf Steg und Decke.....	21
2.2.3 Partialschwingungen und Obertöne.....	21
2.2.4 Das Amplitudenmaximum der Saitenauslenkung.....	22
3 Résumé und Fakten.....	23
4 Bedeutung für die Griffbrettkrümmung.....	24
Anhang:.....	25
I Literatur- und Quellenverzeichnis.....	25
II Abbildungsverzeichnis.....	26
III Tabellenverzeichnis.....	26
IV Erklärung.....	27

Einleitung I

Die hier vorliegende Bachelorarbeit ist im Rahmen eines Seminars für musikalische Akustik am Institut für Wiener Klangstil (Musikalische Akustik) entstanden. Danke an meinen Betreuer Mag. art. Helmut Kühnelt, der einerseits meine Forschungsarbeiten hervorragend unterstützt und geleitet hat und andererseits mein persönliches Interesse für die Arbeit geweckt hat.

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.Fehler! Textmarke nicht definiert. II

Anfangs geht es um die Grundlagen der Saitenschwingung. Welche Wellenformen gibt es? Was genau passiert beim Zupfvorgang, beim Ausschwingen der Saite, und welche Faktoren beeinflussen das Schwingungsverhalten? Im nächsten Teil der Arbeit erkläre ich den Testaufbau und die Messmethoden der eigenen Forschungsarbeit im Rahmen des Seminars für musikalische Akustik. Einerseits wurde das Schwingungsverhalten mit Beschleunigungssensoren beobachtet, andererseits mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera.

Den Hauptteil meiner Arbeit widme ich der Analyse der beobachteten Schwingungsvorgänge sowie der gewonnenen Daten. Unter anderem werden folgende Fragen behandelt: In welchen Bereichen ist die Auslenkung der Schwingungsamplitude am größten? Kann man die theoretischen Grundlagen der Schwingungsausbreitung in extremer Zeitlupe erkennen? Und vieles mehr.

Eine bearbeitete Version des Videos mit der Hochgeschwindigkeitskamera ist ab Mitte Februar 2015 auch auf meinem Youtube-Channel zu finden.

Im Schlussteil wird die Bedeutung der Forschungsarbeit für die Griffbrettkrümmung analysiert und auch praktische Tipps für das Abrichten eines Griffbrettes gegeben.



Abbildung 1: *Hochgeschwindigkeitskamera* (eigene Abb.)

Persönliche Motivation und Hintergründe III

Als Kontrabassist bin ich stets daran interessiert, mein Instrument näher kennenzulernen. Der Kontrabass ist ein sehr komplexer Klangkörper, bei dem unzählige Faktoren Hand in Hand greifen und den Sound beeinflussen. Ein nicht zu vernachlässigender Faktor für Klang und Spielbarkeit sind die Saiten selbst.

Die grundlegenden Fragen, die ich mir vor Beginn der Arbeit gestellt habe, waren:

- Wie sieht die schwingende Saite in Zeitlupe aus?
- Wie verhält sich die Saite, nachdem sie durch Zupfen in Schwingung versetzt wurde?
- Wodurch wird das Schwingungsverhalten der Saite bestimmt?
- In welchen Bereichen ist die Auslenkung der Schwingungsamplitude am größten?
- An welchen Stellen auf dem Griffbrett kann "Scheppern" oder "Schnarren" besonders leicht auftreten? Und was sind die Ursachen dafür?
- In welche Richtungen bewegt sich die Schwingungsebene der Saite?
- Was sind die Schwierigkeiten beim optimalen Abrichten eines Griffbrettes?

Mein persönliches Interesse bei dieser Arbeit bezieht sich sowohl auf die Bewegungsabläufe der Saitenschwingung, als auch auf die Bedeutung für den Instrumentenbau. In meinem Fall speziell, auf die optimale Krümmung des Griffbretts, die sich in erster Linie durch das Saitenschwingungsverhalten ergibt. Da ich im August 2014 an einem Instrumentenbaukurs teilgenommen habe, freut es mich ganz besonders, das dort erworbene Wissen in diese Arbeit einbauen zu können. Danke an Richard Nupi Jenner, Landesinnungsmeister der Streich- und Saiteninstrumentenerzeugung, für die Hilfe und die zahlreichen, informativen Gespräche.

1 Grundlagen zur Saitenschwingung

Der Kontrabass ist ein Saiteninstrument (Chordophon). Seine **Saiten** sind die **frequenzbestimmenden, mechanischen Oszillatoren**, deren Schwingungen über den Korpus als Luftschall abgestrahlt werden oder von Tonabnehmern bzw. Mikrofonen in elektrische Signale umgewandelt werden. Beim Anzupfen der Saite (des mechanischen Oszillators), wird kurzzeitig Energie zugeführt, die dann über den Resonanzkörper des Instruments verstärkt wieder abgestrahlt wird. Gerade bei sehr tiefen Frequenzen und großen Amplituden, wie sie beim Kontrabass vorkommen, sind die Saitenschwingungen mit dem Auge durchaus erkennbar, durch Auflegen der Hand auf die schwingende Kontrabassdecke auch fühlbar.

Die gespannten Saiten sind ein schwingungsfähiges System, dessen Schwingungsverhalten durch das Material, die Länge der Saite sowie die mechanische Zugspannung der Saite in Längsrichtung beeinflusst wird. Schauen wir uns vorerst an, welche unterschiedlichen Wellenformen in diesem System vorkommen und wie deren Parameter miteinander zusammenhängen.

1.1 Wellenformen

Wellen sind Schwingungen, die sich im Raum ausbreiten. Man unterscheidet dabei:

- a) **Transversalwellen**, die Schwingung erfolgt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, z.B. Wasser- oder Seilwellen, die Hauptschwingung der Saitenschwingung
- b) **Longitudinalwellen**, bei denen die Schwingung in Ausbreitungsrichtung erfolgt z.B. Schallwellen

Bei Saiten ist die Transversal-Schwingung in erster Linie für die Tonerzeugung relevant. Dennoch existiert in geringem Maße auch die Longitudinal-Komponente, die durch die Dehnung der Saite in Längsrichtung auftritt. Die entstehenden Schwingungen bezeichnet man als **mechanische Wellen**. Sie sind an ein physisches Medium wie Wasser, Luft, eine Saite oder Ähnliches gebunden. Elektromagnetische Wellen, wie Licht, Mikrowellen oder Röntgenstrahlung können sich auch im Vakuum ausbreiten.

Die drei wesentlichen Parameter für eine Schwingung sind:

- (1) Die **Frequenz** (f): Sie beschreibt die Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit. Jede periodische Schwingung hat eine Frequenz. Sie bestimmt die Tonhöhe und wird in Hertz (Hz) gemessen. Ein Hertz bedeutet eine Schwingung pro Sekunde. Darunter versteht man eine volle Schwingungs-Periode aus zwei Halbschwingungen.
- (2) Die **Wellenlänge** (λ), die sich durch die **Ausbreitungsgeschwindigkeit** ergibt. Sie beschreibt den Weg, den die Welle innerhalb einer Periode zurücklegt.
- (3) Die **Amplitude**: Sie ist die Schwingungsweite und bestimmt die **Lautstärke** eines Tons.

Ein direkter Zusammenhang besteht zwischen der Wellenlänge und der Frequenz. Je schneller eine Schwingung ist, um so kürzer ist der Weg, den sie während ihrer Dauer zurückgelegt. Niedrige Frequenzen bedeuten also große Wellenlängen, hohe Frequenzen kleine Wellenlängen (Gedan, Jörg: *Akustische Grundlagen der Musik*, Seite 3 f).

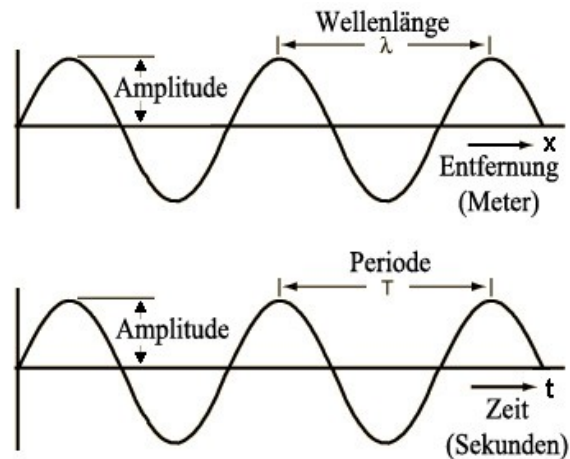


Abbildung 2: *Sinuswellen, Amplitude, Wellenlänge, Periode* (eigene Abb.)

Tabelle 1: **Zusammenhänge**: die Frequenz ist mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit (c) mit ihrer Wellenlänge (λ) verknüpft.

Physikalischer Wert	Symbol	Einheit	Abkürzung	Formel
Periode	$T = 1 / f$	Sekunde	s	$T = \lambda / c$
Frequenz	$f = 1 / T$	Hertz	Hz = 1/s	$f = c / \lambda$
Wellenlänge	λ	Meter	m	$\lambda = c / f$
Ausbreitungsgeschwindigkeit	c	Meter pro Sekunde	m/s	$c = \lambda \cdot f$
Quergeschwindigkeit (Schnelle)	v	Meter pro Sekunde	m/s	

Länge der Mensur (Länge der schwingenden Saite) des verwendeten Basses ist **106,5 cm**.

Die **Frequenzen der leeren Basssaiten** (bei Kammerton a' = 440 Hz) liegen bei:

E = 41,2035 Hz **A** = 55 Hz **D** = 73,4162 Hz **G** = 97,9989 Hz

Die **Grundschiwingung** einer Saite ist doppelt so groß wie deren Länge.

Ausbreitungsgeschwindigkeit des **E** = 41,2035 Hz ist $c = 2 \cdot 1,065 \cdot 41,2035 = 87,763 \text{ m/s}$

Schallgeschwindigkeit von trockener **Luft** bei 20°C ist $c = 343 \text{ m/s}$

Schallgeschwindigkeit von **Stahl** bei 20°C ist $v \approx 5920 \text{ m/s}$ (Longitudinalschwingung, Schnelle)

1.2 Die gezupfte Saite

Lenkt man eine Saite aus ihrer Ruhelage aus (durch Zupfen oder Streichen), so treten rücktreibende Kräfte auf, und die Saite kehrt in Form einer gedämpften longitudinalen und transversalen Schwingung in ihre Ruhelage zurück. Das geschieht durch Schallabstrahlung und interne Reibungsverluste (Dissipation), sodass die Lautstärke, nach Erreichen des Maximums, ständig abnimmt (Jagdmann, Dirk: *Analyse und Resynthese des Gitarrenklangs* S.13). Durch die hervorgerufene Auslenkung entstehen mechanische Wellen, die sich entlang der Saite ausbreiten und ihre Schwingungen auf das Instrument übertragen. In erster Linie sind es "stehende" Transversalwellen, die hauptverantwortlich für die Tongebung sind.

1.2.1 Zupfvorgang und Teilwellen

Beim Anzupfen wird die Saite an einem Punkt durch den Finger des Spielers aus ihrer Ruheposition gebracht. Die Saite wird dreieckförmig ausgelenkt. Wenn der Finger die Saite verlässt, beginnt der Schwingungsvorgang. Vom Punkt an dem die Saitenauslenkung stattgefunden hat, breiten sich **zwei entgegengesetzt laufende, transversale Teilwellen** aus. Diese werden in der Zeitlupenbetrachtung der Hochgeschwindigkeitskamera als Saitenknicke sichtbar (Siehe Abbildung 13 und 14). An den **festen Enden** der Saite (Sattel oben und Steg unten) werden diese phasenversetzt reflektiert. Da man im unteren Bereich des Griffbretts zupft, wird die nach unten laufende Teilwelle früher reflektiert als die obere.

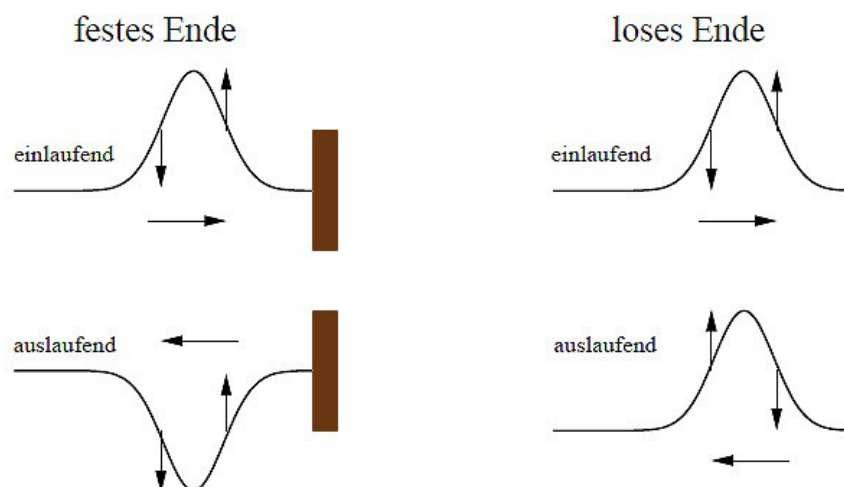


Abbildung 3: *Reflexion stehender Transversalwellen* (eigene Abb.)

Die Bewegung der oben beschriebenen Bewegung wird auch durch die allgemeine Wellengleichung und deren Lösung beschrieben (Jagdmann, Dirk: *Analyse und Resynthese des Gitarrenklangs* S.16):

$$y = f_1(ct - x) + f_2(ct + x)$$

In dem späteren Test wurde das Schwingungsverhalten auf der leeren E-Saite beobachtet. Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit** (c), mit der diese Welle entlang der Saite läuft, lässt sich leicht mit der einfachen Formel $c = \lambda \cdot f$ ausrechnen. Wir wissen die Frequenz ($f = 41,2035$ Hz) und die Wellenlänge (λ), die die doppelte Länge der Mensur (106,5 cm) beträgt. So ergibt sich:

$$\text{Ausbreitungsgeschwindigkeit von } E = 2 \cdot 1,065 \cdot 41,2035 = \underline{\underline{87,763\text{m/s}}}$$

Die beiden Teilwellen laufen also mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 87,763 m/s oder rund 316 km/h auseinander. Diese Ausbreitungsgeschwindigkeit der Teilwellen in Saitenlängsrichtung (c) darf nicht mit der Geschwindigkeit verwechselt werden, mit der die Saite in Querrichtung hin und her schwingt (Schnelle v). Außerdem ist sie frequenzabhängig. Das heißt, hochfrequente Signale laufen schneller als niedrigfrequente (Dispersion). Da der Schwingungsvorgang in der Praxis ziemlich komplex ist, verwendet man in der Praxis idealisierte Modelle zur mathematischen Berechnung.

1.2.2 Schwingungsbeeinflussende Faktoren

In der Realität verliert die Saite beim Hin- und Herschwingen an Energie. Zwar ähneln aufeinanderfolgende Schwingungen einander (v.a. in der Auskling-Phase), doch genau genommen ist das Zupfsignal nicht periodisch, bzw. quasiperiodisch. Zum Verständnis der Bewegungsabläufe ist eine vereinfachte, idealisierte Betrachtung kurzer Zeitausschnitte durchwegs sinnvoll. **Ursache für den Energieverlust sind:**

- a) **Dissipation** (lat. für „Zerstreuung“): Das bedeutet, dass durch Reibung eine Umwandlung von mechanischer Energie in Wärme stattfindet.
- b) Die **Abstrahlung von Schallenergie** ist in geringem Maße auch eine Ursache für den Energieverlust.
- c) Die **Biegesteifigkeit** der Saite selbst erschwert das Krümmen. Diese hängt von Material ab und ist umso stärker, je dicker die Saite und je weniger sie gespannt ist. Also sind besonders die Basssaiten betroffen. Um die Biegesteifigkeit zu mindern, umspinnt man bei

Stahlsaiten einen möglichst dünnen Stahlkern. Trotz des dünnen Kerns kann man die Biegesteifigkeit aber nur reduzieren, nicht aufheben. Es gibt auch umwickelte Darm- und Nylonsaiten (Zollner, Manfred: *Physik der Elektrogitarre*, Seite 5 und 12).

Bei gegriffenen Tönen beeinflussen die Finger zusätzlich das Ausschwingverhalten und die Klangfarbe. Ein wenig Vibrato lässt die Saite länger nachklingen, wenig Druck auf die Saiten dämpft die Schwingung schneller ab, während kräftiger Druck, speziell mit den Fingerkuppen, die Auskling-Phase deutlich verlängert.

1.2.3 Schwingungsausbreitung

Der Klangbild des Kontrabasses wird in erster Linie durch die Schwingung der Saite erzeugt. Die kinetische Energie der Saitenschwingung überträgt sich als Longitudinal- und Transversalwelle auf den Kontrabasskörper. Dieser führt die Schwingungen aus, die ihm über den Steg, den Sattel und den Saitenhalter übertragen werden. Der **Steg**, als **wichtigster Schwingungsüberträger**, macht dabei leichte Kipp- und Drehbewegungen und überträgt die Saitenschwingung, über seine Füße auf die Decke, den Bassbalken und über den Stimmstock auf den Boden des Instruments. Der Korpus ist das eigentliche abstrahlende Element, mit der Hauptabstrahlrichtung in einem Winkel von 30° nach vorne und dem größten Lautstärkenpegel in Höhe der f -Löcher. Lediglich ein kleiner Frequenzbereich um 100 Hz wird allseitig abgestrahlt (Sisera, Luca, Kapitel 5).

1.2.4 Entwicklung der Obertöne eines Klangs

Ein sehr interessantes Phänomen findet man in Bezug auf die Lautstärken der gezupften Töne. Man erkennt es, indem man die Hüllkurve eines aufgenommenen Tones soweit vergrößert, dass man die einzelnen Schwingungsperioden erkennt. Hier nun ein paar Auszüge einzelner Töne einer aufgenommenen Basslinie.

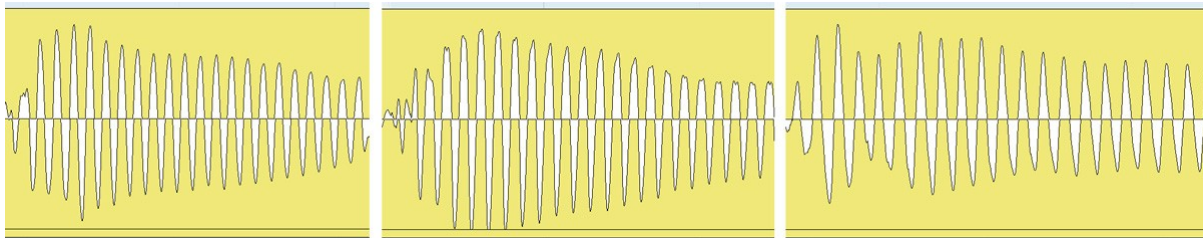


Abbildung 4: *Hüllkurve einzelner Kontrabasstöne*, aufgenommen mit einem Kondensatormikrofon (DPA d:vote 4099B) (Eigene Abb.)

Es ist deutlich zu erkennen, dass es einige Schwingungsperioden dauert, bis die Lautstärke ihre maximale Lautstärke erreicht hat. Beim dritten Ton (siehe oben) wurde die Saite

besonders kräftig angezupft. Hier war die Laustärke nach ein bis zwei Perioden am Maximum, nahm dann zwei Perioden ab, um anschließend wieder anzusteigen. Direkt nach dem Anzupfen, genauer gesagt nach einer Periode, erreicht zwar die Saite die maximale Auslenkung, nicht aber die maximale Lautstärke. Grund der maximalen Auslenkung ist die erstmalige Überlagerung der beiden Teilwellen, die beim Zupfen entstanden sind (Siehe auch Kapitel 2.1 und 2.2). Den Grund für den **verzögerten Anstieg der Lautstärke** beschreibt Dirk Jagdmann in seiner Diplomarbeit *Analyse und Resynthese des Gitarrenklangs* in Kapitel 2. Ich möchte ihn hier etwas zusammengefasst wiedergeben:

Im Sonogramm zeigt sich, dass die Attackphase eines Klangs (eines gespielten Tones) aus vielen Obertönen besteht. Es ist ein Klanggemisch, das nicht unbedingt den reinen Obertönen der Grundfrequenz entspricht. Ein Blick in die Sustainphase desselben Tones zeigt, dass Klang nun hauptsächlich aus reinen Obertönen besteht. Es geschieht folgendes:

Nach dem Anzupfen laufen zwei Teilwellen in entgegengesetzte Richtungen und werden an den Saitenenden (Steg und Sattel) reflektiert. Dabei werden jedoch die Frequenzanteile, die nicht einem reinen Oberton entsprechen, stark abgedämpft. Die Energie dieser abgedämpften Frequenzen wird nun auf jene Obertöne übertragen, die reine Obertöne sind. Somit nimmt die Amplitude dieser reinen Obertonfrequenzen zu, und die Gesamtlautstärke vergrößert sich innerhalb der ersten Perioden (Jagdmann, Dirk: *Analyse und Resynthese des Gitarrenklangs*, Kapitel 2). *Reine Obertöne* bedeutet, dass sie ein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz haben. Man spricht hier von harmonischen Teilschwingungen. Mit etwas Übung kann man in meinem Video deren Schwingungsbäuche und Knoten bei starker Zeitlupe erkennen.

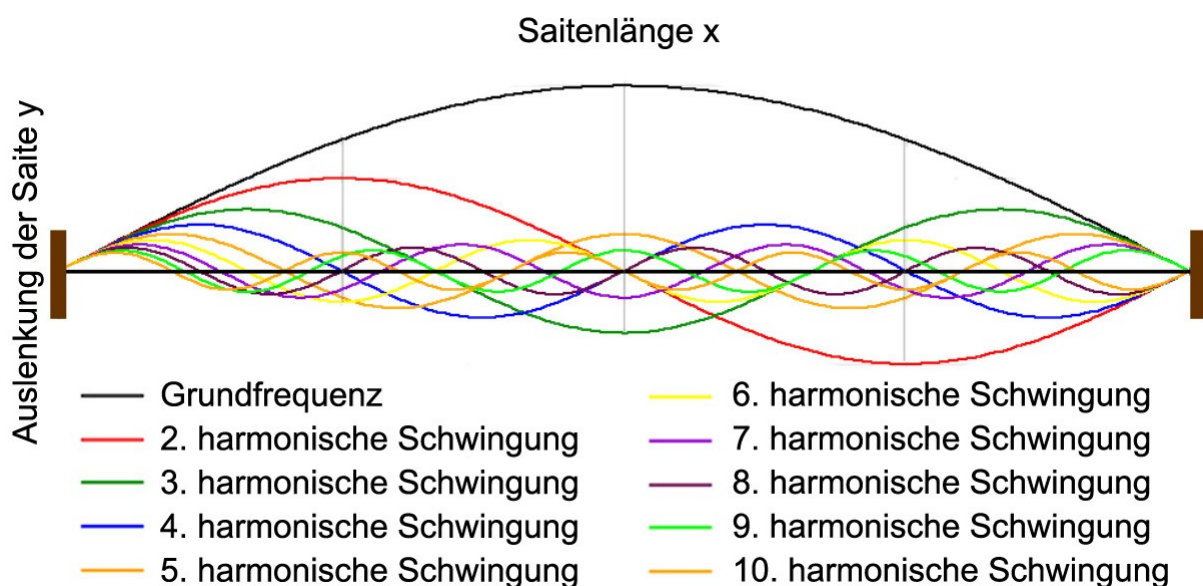


Abbildung 5: *gleichzeitige Überlagerung der Teiltöne* (eigene Abb.)

Ein weiteres Phänomen bezüglich der Teiltöne beschreibt Manfred Zollner in *Physik der Elektrogitarre*. Durch die dispersive Wellenausbreitung (hohe Frequenzen laufen schneller als niedrige) und die Biegesteifigkeit der Saite werden die Teiltonfrequenzen mit steigender Frequenz gespreizt. Dies kommt bei hohen Frequenzen stärker zum Tragen als bei niedrigen. Eine genaue Beschreibung dazu findet man in Zollner, Manfred: *Physik der Elektrogitarre* Kapitel 1.3.1.

1.2.5 Das Ausschwingverhalten

Nachdem die gezupfte Saite ihr Lautstärkenmaximum erreicht hat, beginnt die Ausklingphase (Release). Ihre Schwingung ist frei und gedämpft. Frei bedeutet, dass keine weitere Energie hinzugefügt wird. Gedämpft heißt, dass die Schwingungsenergie durch Schall abgestrahlt und als Wärme dissipiert wird. Die Zeit bis zum Verklingen des Tones nennt man **Release**. Während sich im Attack sehr viele Teiltöne ausbilden, werden vor allem die höheren unter ihnen beim Ausschwingvorgang stark gedämpft und der Ton klingt stumpf und obertonarm.

1.3 Die Hüllenkurve

Ein musikalischer Ton verändert sich im Laufe seines Erklingens und kann in vier zeitliche Abschnitte unterteilt werden:

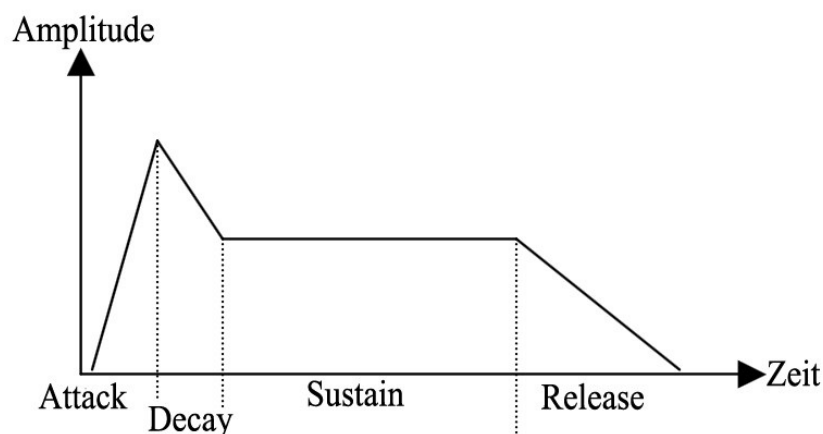


Abbildung 6: *Schema einer Hüllenkurve* (eigene Abb.)

- (1) **Attack** - die Einschwingzeit bis zum Maximum der Lautstärke. Der Attack beinhaltet die meiste Information über das Instrument. In dieser Phase erklingt ein ausgeprägtes

Teiltonspektrum, mit teils auch inharmonischen Obertönen. Der Klang ist stark vom Anregungsvorgang und den spezifischen Eigenschaften des Instruments beeinflusst.

- (2) **Decay** - auf Deutsch "Abfall oder Abklingen" beschreibt den Abschnitt von der maximalen Amplitude bis zum Erreichen des Sustain-Levels.
- (3) **Sustain** - ist "stationäre Phase" des Klanges mit einem relativ gleichmäßigen Lautstärkepegel und Teiltonspektrum. Beim Zupfen des Kontrabasses (auch bei anderen Zupf- oder Schlaginstrumenten) gibt es keine Sustainphase, da der Klang nach dem einmaligen Zupfen ständig an Lautstärke verliert. Beim Streichen und bei Blasinstrumenten existiert eine Sustainphase. Sie entsteht durch das Zuführen an Energie durch Weiterstreichen bzw. Weiterblasen.
- (4) **Release** - ist die Zeit bis zum Verklingen des Tones. In der Release-Phase werden die Obertöne stark gedämpft. Deshalb klingt der Ton in der Auskling-Phase stumpfer und Obertonärmer.

Bei der gezupften Saite kann man die Hüllkurve auf Attack und Release reduzieren.

2 Testaufbau und Messmethoden

Vorab sei angemerkt, dass bei den Versuchen und Messungen das Schwingungsverhalten an meinem Kontrabass, unter der speziellen Betrachtung der **E-Saite** (Stahlkern mit Nickelumwicklung, Marke: Dáddario Helicore Hybrid, Medium), untersucht wurde. Erstens mit Beschleunigungssensoren und zweitens mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera. Um Saitenprellen (Schnarren, oder Scheppern) zu vermeiden, bedarf es bei einem optimal abgerichteten Griffbrett einer konkaven Hohlkehle, sowie einer angemessen hohen Saitenlage. Um zu erkennen wo die Problemzonen innerhalb dieser Hohlkehle liegen, wurde die **E-Saite** immer sehr stark angezupft (*forte* bis *fortissimo*). Dabei wurde die Saite schräg in Richtung Korpus ausgelenkt (etwa 30° bis 45° in Richtung Kontrabassdecke). Das entspricht der herkömmlichen Art des Zupfens, wie es beim "normalen spielen" üblich ist. Eine Ausnahmeform ist das sogenannte "Slappen". Hierbei greifen die zupfenden Finger zwischen Saite und Griffbrett und lenken die Saite bewusst normal zur Kontrabassdecke aus, um Saitenprellen zu provozieren.

2.1 Analyse mit Hilfe von Beschleunigungssensoren

Um die Auslenkung der Saite an einer lokalen Stelle zu berechnen und um ihre transversale Schwingungsebene erfassen zu können, haben wir Beschleunigungssensoren verwendet. Zwei Sensoren wurden im 90° Winkel, an der E-Saite angebracht. Das heißt, einer senkrecht und der andere waagrecht bezogen auf Steg bzw. Griffbrett. Die Sensoren wurden 12cm oberhalb des Griffbrettendes, bzw. 34cm vom Steg entfernt positioniert, also knapp oberhalb des Anzupfpunktes. Das entspricht 36,21% der Saitenlänge oder anders gesagt, etwas weniger als $\frac{1}{3}$ der Mensur von 106,5cm. Wir haben also eine Position gewählt, die keinem harmonischen Teilton entspricht. Somit waren die Beschleunigungssensoren auf keinem Knotenpunkt einer stehenden Welle, sondern dazwischen. Die Anzupfstärke war stets *forte*.

Messungen und deren Ergebnisse:

Messen konnten wir die Beschleunigung der Transversalwelle an der Messposition. Daraus wurde die Auslenkung als Funktion der Zeit berechnet.

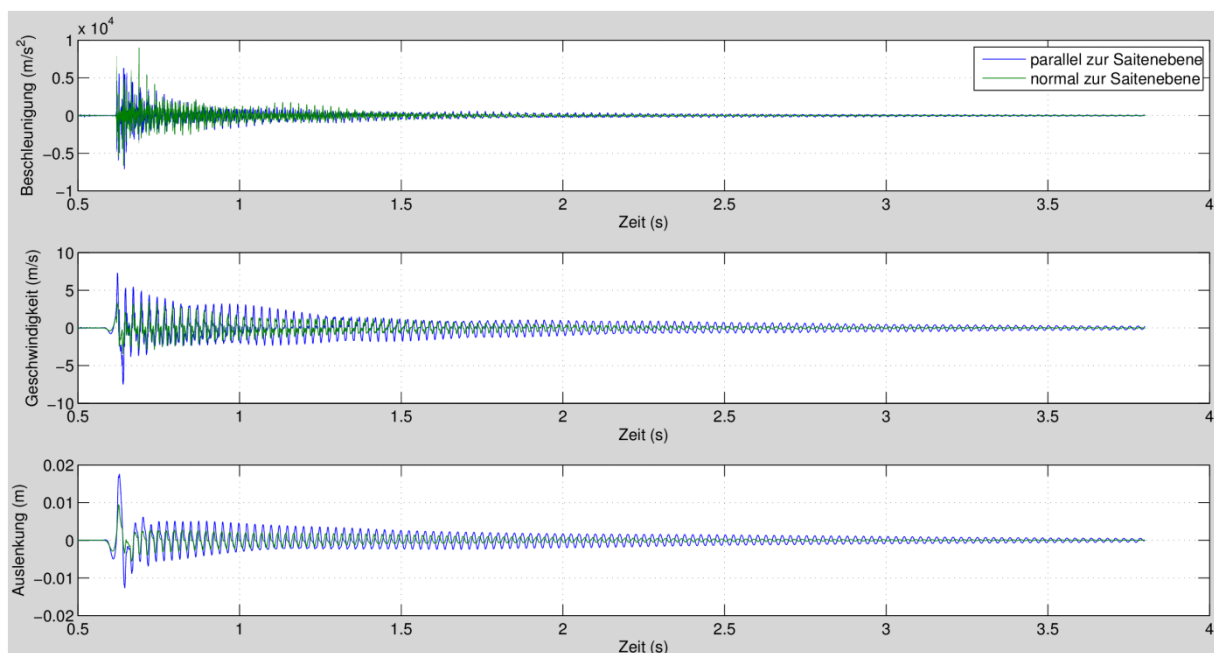


Abbildung 7: **Die gemessenen Signale eines Tones auf der E-Saite** (Abb. von Helmut Kühnelt, verwendetes Programm zur Analyse: Matlab)

Die Daten aus Abbildung 7 (siehe oben) zeigen uns bereits einige interessante Ergebnisse. Nach einer Anfangsauslenkung von 1,8 cm knapp nach dem Loslassen der Saite, hat diese ihre maximale Amplitude erreicht. Es dauert drei bis vier Perioden, bis die Saite eine relativ gleichmäßige, gedämpfte Schwingung erreicht hat. Ab diesem Zeitpunkt verliert die Saite kontinuierlich an Energie, und das erstaunlich gleichmäßig. Auffällig ist auch, dass die

Saitenauslenkung parallel zur Schwingungsebene deutlich größer ist als die normal verlaufende Auslenkung. Das ist eine beruhigende Tatsache, denn die Auslenkung, die normal zur Schwingungsebene verläuft, ist in erster Linie für Saitenprellen, Schnarren oder Scheppern verantwortlich. Nach annähernd einer Periode gibt es eine Auffälligkeit im Schwingungsverlauf, auf die ich später noch zurückkomme.

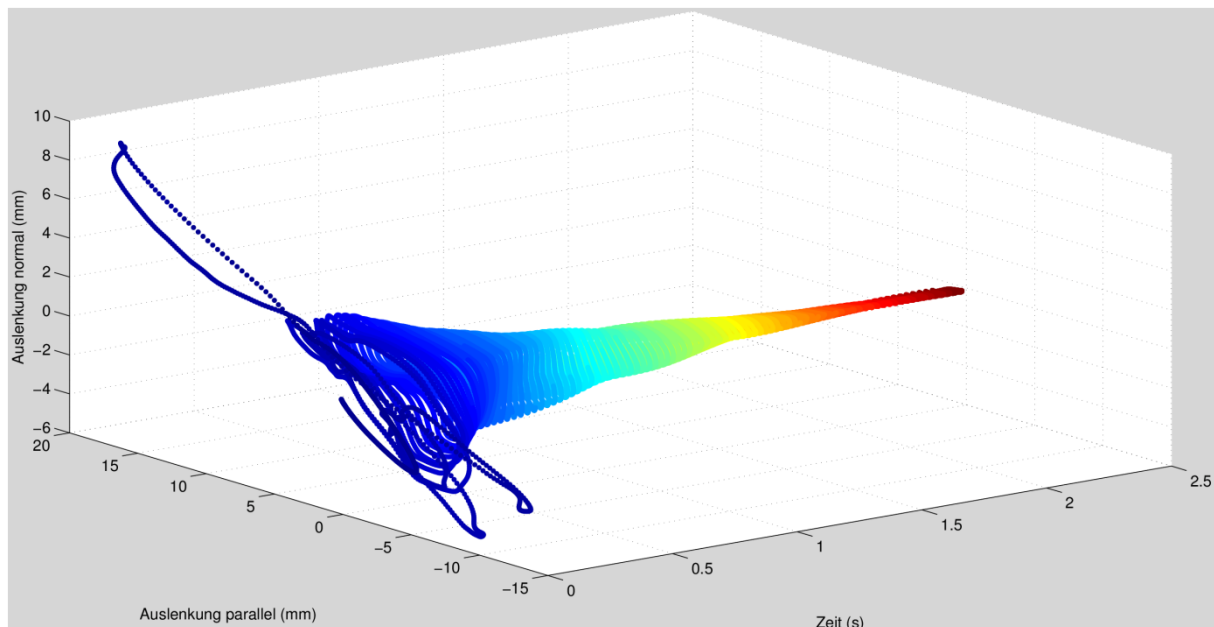


Abbildung 8: **Beschleunigungssensor Trajektoriekurve**, E-Saite, ganzer Ton (Abb. von Helmut Kühnelt, verwendetes Programm zur Analyse: *Matlab*)

Abbildung 8 (siehe oben) zeigt uns ein Weg-Zeit-Diagramm des gemessenen Schwingungsverlaufs. Besonders auffällig ist die große, unsymmetrische Anfangsauslenkung. In den ersten Perioden erkennt man einen scheinbar unkontrollierten Schwingungszustand mit drei herausstechenden Maxima. Zwei davon breiten sich schräg nach unten in Richtung Griffbrett aus. Die Vermutung, dass dies bei einer niedrigen Saitenlage leicht zu Saitenprellen führen könnte, liegt nahe. Der spätere Verlauf der Saitenschwingung scheint relativ geordnet und symmetrisch zu verlaufen. Die Gesamtamplitude hat sich nach einer halben Sekunde bereits deutlich verringert. Scheinbar wird die Schwingungsrichtung stark durch den Winkel der Anzupfrichtung beeinflusst. Die Saite schwingt nämlich in einer kreisenden Bahn, die in etwa dem Auslenkungswinkel entspricht. Dies ist auch gut in der nächsten Abbildung zu erkennen, die uns eine Vergrößerung des Anfangs der Schwingung zeigt.

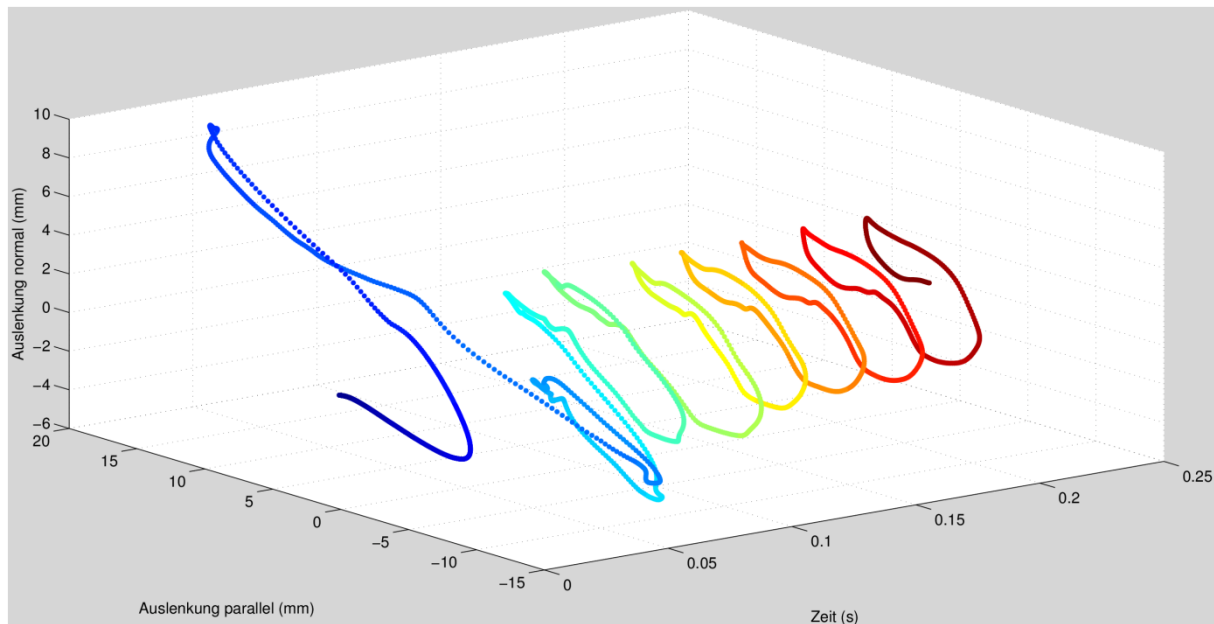


Abbildung 9: *Beschleunigungssensor Trajektoriekurve, E-Saite, Beginn des Schwingungsvorganges* (Abb. von Helmut Kühnelt, verwendetes Programm zur Analyse: Matlab)

In Abbildung 9 erkennt man, dass die erste maximale Auslenkung die größte ist. Da das Maximum der Auslenkung an der gemessenen Stelle schräg nach oben zeigt, ist Saitenprellen an dieser Position ausgeschlossen. Kurz nachdem beide Saitenknicke (Teilwellen) nach einer Periode zur Anzupfstelle zurückkehren, wird die Schwingung plötzlich abgelenkt. Die Geschwindigkeit des Sensors, der normal zur Saitenebene befestigt ist, ändert schlagartig die Richtung. In Abbildung 9 sieht es so aus, als würde die Saite zwei bis dreimal gegen das Griffbrett geschleudert werden. Die Schwingungsrichtung ändert sich und ebenso das folgende Schwingungsverhalten. Das entstandene **Saitenprellen** ist höchst wahrscheinlich der Grund für die nach oben hin besonders spitzförmige Auslenkung. Eine Vergrößerung eines späteren Zeitpunktes zeigt eine deutliche Abrundung sowie einen bedeutend gleichförmigeren Schwingungsverlauf (siehe Abbildung 10). Dennoch kann man an der Form des Schwingungsverlaufes erkennen, dass zwei Teilwellen an deren Entstehung beteiligt sind. Die kurvige Bahn der Schwingung ähnelt zu Beginn einer doppelt geschwungenen Nierenform. Etwas später kann man die beiden Teilwellen an einem annähernd sichelförmigen Schwingungsverlauf mit einer kleineren Amplitude erkennen.

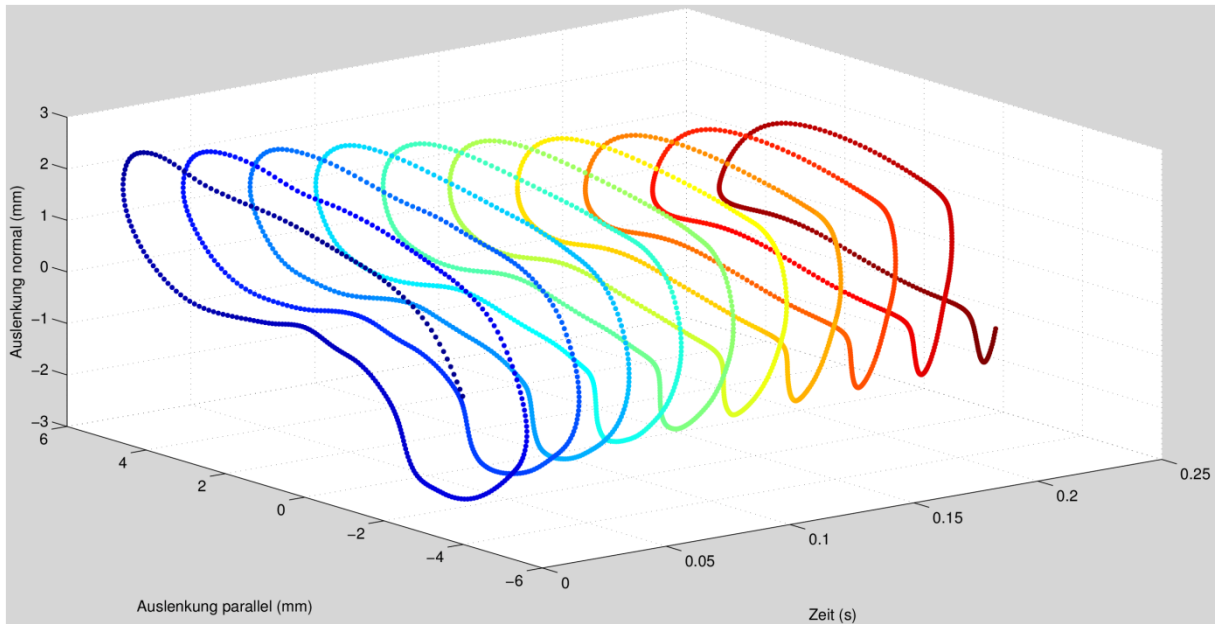


Abbildung 10: **Beschleunigungssensor Trajektoriekurve**, E-Saite, selber Ton stationär nach etwa 1,2 Sekunden Schwingungsdauer (Abb. von Helmut Kühnelt, verwendetes Programm zur Analyse: Matlab)

Um sich das Schwingungsverhalten auf der Saitenebene besser vorstellen zu können, habe ich eine Grafik dazu entworfen (Abbildung 11).

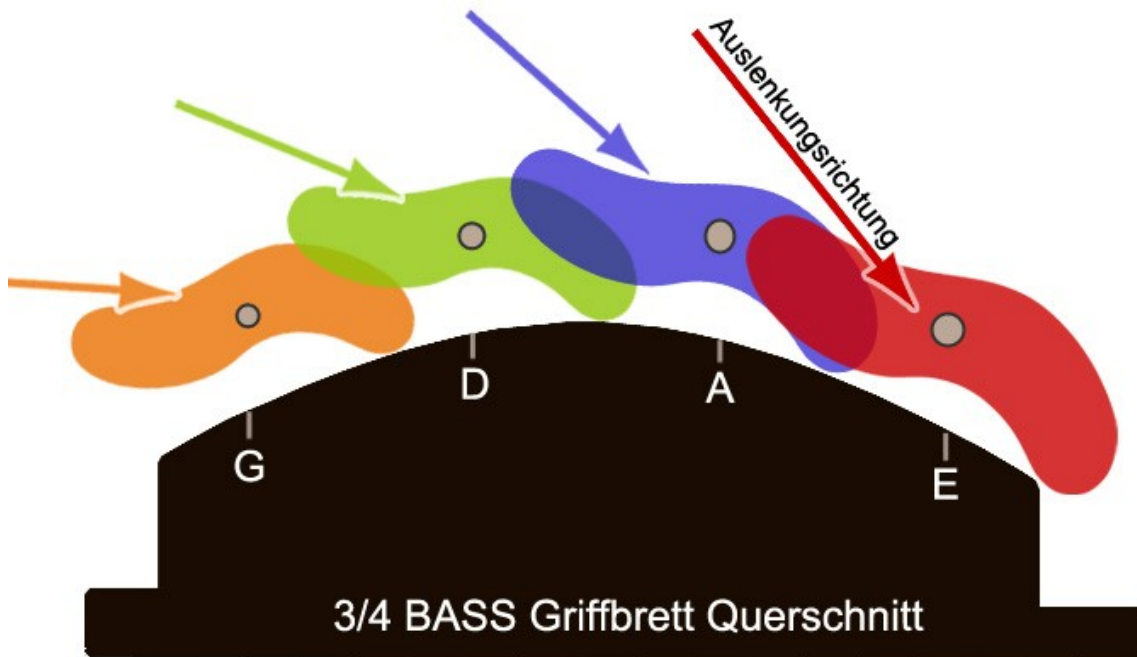


Abbildung 11: **angenommener Schwingungsverlauf auf der Saitenebene**, Querschnitt durch das Griffbrett, bei einer herkömmlichen Saitenauslenkung in *fortissimo* (Eigene Abbildung).

Abbildung 11 soll in erster Linie zum besseren Verständnis und der besseren Vorstellung des Schwingungsverlaufs dienen. Die Abbildung und deren beinhaltende Schwingungsverläufe sind angenommene Werte und nicht das Ergebnis gemessener Daten. Die Bereiche der angenommenen maximalen Auslenkung sind farbig markiert. Die Krümmung des Griffbretts stammt von einer Geigenbauschablone. In der Praxis verschiebt sich die Auslenkungsrichtung beim Zupfen auf den höheren Saiten. Das geschieht aufgrund des Umgreifens, ob dem Abstützen mit dem Daumen am Griffbrett neben der E-Saite und der Zupfrichtung zur jeweils tieferen Saite. Abbildung 11 zeigt deutlich, dass die Auslenkungsrichtung der zupfenden Finger einen großen Einfluss darauf hat, ob ein Saitenprellen zustande kommt oder nicht. Bei einer zu niedrigen Saitenlage verhindert das Griffbrett eine freie, gedämpfte Schwingung. Es kommt zum Saitenprellen (Scheppern oder Schnarren). Bei der G- und D-Saite ist die Wölbung des Griffbretts zusätzlich ein Hindernis. Bei der A- und E-Saite hingegen kommt die abfallende Wölbung des Griffbretts einer größeren möglichen freien Schwingungsamplitude entgegen.

2.2 Analyse mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera

Ziel der Analyse mit der Hochgeschwindigkeitskamera war es, die physikalischen Prozesse in besonders langsamer Zeitlupe sichtbar zu machen. Bedingt durch den frontalen Blickwinkel kann man so hauptsächlich die parallel verlaufenden Schwingungen erkennen, allerdings werden bei starker Vergrößerung bestimmter Positionen auch horizontale Bewegungen sichtbar. Um ein Verrutschen des Instruments auszuschließen, haben wir den Kontrabass, quer auf den Zargen stehend, auf einem stabilen Tisch fixiert. Die Hochgeschwindigkeitskamera haben wir auf 800 FPS (frames per second) eingestellt. Beim Betrachten der Zeitlupe mit 25 FPS ergibt sich somit eine rund 32-fache Verlangsamung (eine Sekunde wird in 31,25 Sekunden abgespielt). Von einem Frame bis zum nächsten vergehen 1,25 Millisekunden (0,00125 Sekunden).

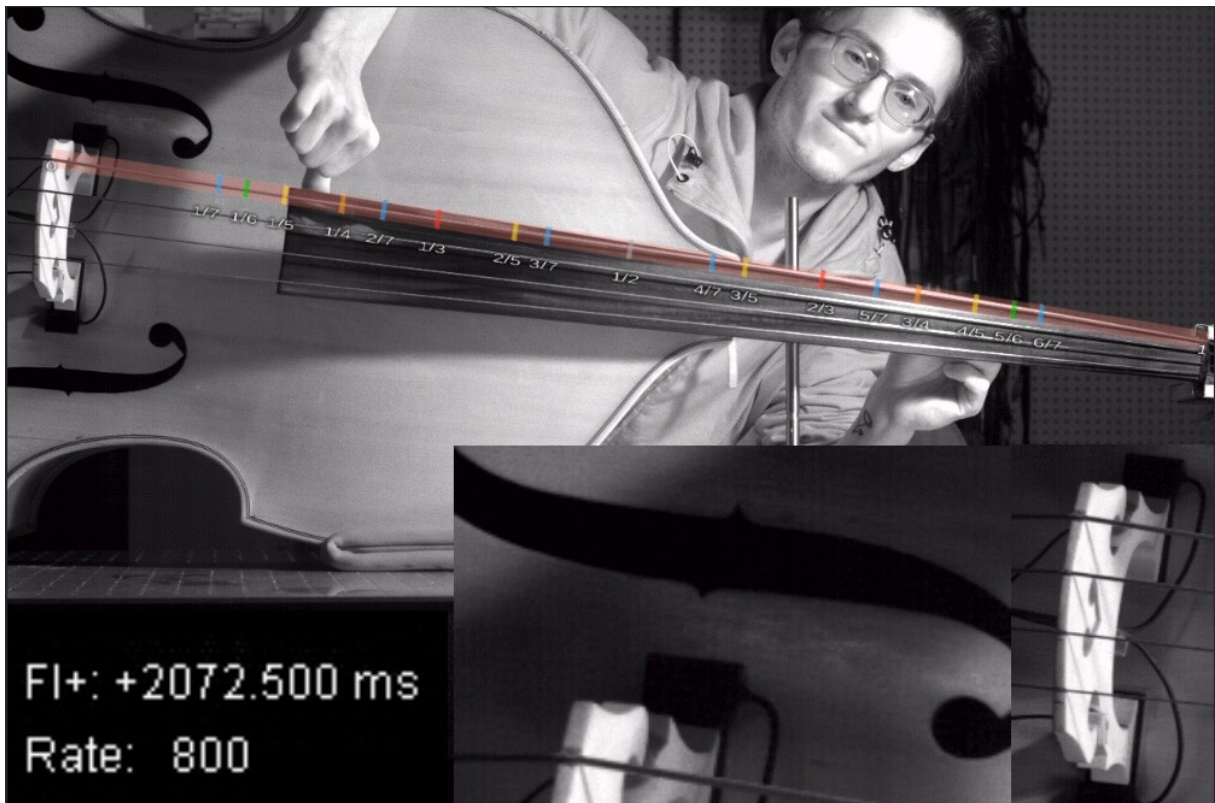


Abbildung 12: *Screenshot aus dem bearbeiteten Video* (eigene Abb.)

2.2.1 Ausbreitung der Teilwellen

Wie bereits in Punkt 1.2.1 beschrieben, breiten sich nach dem Anzupfen zwei Teilwellen in entgegengesetzte Richtungen aus. Das tun sie mit einer **Geschwindigkeit** von **87,763m/s**. Abbildungen 13 und 14 zeigen uns die Einzelbilder des Schwingungsanfangs aus dem Video. Da wir die Geschwindigkeit der wandernden Saitenknicke wissen, habe ich deren Position berechnet und farblich markiert. Die sich bewegenden Teilwellen kann man in den Abbildungen deutlich erkennen. Die zuerst nach unten laufende Teilwelle ist blau dargestellt, die nach oben laufende rot.



Abbildung 13: *Schwingungsausbreitung der Teilwellen mit 87,763m/s*, Teil 1 (eigene Abb.)

Steg und Sattel des Instruments gelten als **festes Ende**, da sie näherungsweise in Ruhe sind. Dort angelangt, ändert die Schwingung ihre Richtung um annähernd 180° (Phasensprung). Wie bereits in Kapitel 1.2.4 beschrieben, werden dabei jene Frequenzanteile, die nicht einem reinen Oberton entsprechen, stark abgedämpft. Da sich die Energie dieser abgedämpften Frequenzen auf die reinen Obertöne übertragen wird, nimmt deren Amplitude zu. Das Resultat ist eine kurzfristig Erhöhung der Gesamtlautstärke nach dem Einschwingen.



Abbildung 14: *Schwingungsausbreitung der Teilwellen mit 87,763m/s, Teil 2 (eigene Abb.)*

Knapp nach dem Umkehren der nach oben laufenden Teilwelle am Sattel (nach $\sim 12,5$ ms), ist eine erste **Überlagerung der beiden Teilwellen** zu erkennen. Das geschieht im oberen Bereich der Saite, am **Spiegelpunkt der Anzupfstelle**. Da die Schwingung bei der Umkehr einen Phasensprung macht, überlagern sich die beiden Teilwellen so, dass sie die Saite gleichzeitig in dieselbe Richtung auslenken. Die Schwingungsamplitude in diesem Bereich vergrößert sich sogar soweit, dass die E-Saite über die A-Saite hinwegschwingt. Bei einem

bestimmten Auslenkungswinkel kann es also vorkommen, dass die Saiten aneinanderschlagen. Würde man die Anzupfstelle verschieben, würde sich dementsprechend auch der Platz der Schwingungsüberlagerung verändern. Die gewählte Anzupfstelle im unteren Drittel der Saite hat sich aus Klanggründen aber bewährt, weswegen viele der bekannten Kontrabassisten an dieser Stelle zupfen. Nach rund 24 ms ist eine Schwingungsperiode vorbei.

2.2.2 Schwingungsübertragung auf Steg und Decke

Betrachtet man den **Steg**, der die Saitenschwingung auf den Korpus überträgt, kann man erkennen, dass er **leichte Auf- und Abbewegungen** macht. Da der Steg aus Ahorn im Vergleich zur Fichtendecke des Korpus relativ hart ist, nehme ich an, dass man eine Schwingungsüberlagerung des Stegs selbst und der Decke erkennt. Einerseits wird die Decke abwechselnd von den beiden Stegfüßen eingedrückt und andererseits schwingt der Steg in geringem Maße selbst. Das erste massive Eindringen der Decke, sowie die damit verbundene Deckenschwingung selbst, kann man am besten im Bereich des oberen f -Lochs (seitig des Bassbalkens) erkennen. Das speziell bei starker Vergrößerung des Videos an dieser Stelle. Die Decke im Bereich des f -Lochs seitens der G-Saite wird bedeutend weniger eingedrückt, da die Decke dort durch den Stimmstock gestützt wird. Die daraus resultierenden Auf- und Abbewegungen des Steges betragen etwa einen Millimeter, stets im Rhythmus der beiden Teilwellen. Bei starker Vergrößerung des Steges kann man besonders die schwingenden Stegfüße sehen. Die Stegfüße passen sich nämlich der unregelmäßig schwingenden Kontrabassdecke an.

2.2.3 Partialschwingungen und Obertöne

Untersucht man den gesamten Schwingungsvorgang auf der Saite, kann man mit etwas Übung die verschiedenen **mitschwingenden reinen Teiltöne (Obertöne)** erkennen. Als Hilfe habe im Video ich einen farbigen Raster über die Saite gelegt, der die Knotenpunkte der ersten 7 Teiltöne kennzeichnet (siehe Abbildung 12). Den zweiten, dritten und vierten Teilton erkennt man besonders gut. Da die unterschiedlich schwingenden Saitenabschnitte der Partialschwingungen immer enger zusammen rutschen und noch dazu mit einer unterschiedlichen Geschwindigkeit schwingen (Dispersion), kann man ab dem siebenten Teilton nur noch schwierig weitere Obertonschwingungen erkennen.

Da sich die Wellen der Obertöne scheinbar nicht ausbreiten, bezeichnet man sie als stehende Wellen. Diese bilden ortsfeste Knoten und Bäuche. Somit gibt es gewisse Positionen auf der

Saite, bei denen die momentane Auslenkung besonders groß bzw. klein ist. Die Saite schwingt auf all diese **verschiedenen Arten gleichzeitig**. Es überlagern sich die entstandenen Teiltöne, transversale und longitudinale Schwingungen, sowie vom Korpus und Steg übernommene und reflektierte Schwingungen zu einem insgesamt komplexen Schwingungsprozess.

2.2.4 Das Amplitudenmaximum der Saitenauslenkung

Eine interessante Auffälligkeit gibt es in Bezug auf die maximale Auslenkung der leeren E-Saite. Die Saitenauslenkung stößt an zwei Punkten an ein Maximum, das annähernd gleich groß ist. Eine exakte Bestimmung der Position ist schwer, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit (c) mit 87,763m/s so schnell ist, dass selbst bei 32-facher Zeitlupe ein gewisser Spielraum zwischen zwei Frames bleibt. Ein Abbildungsversuch ist in Abbildung 15 zu sehen.

Die erstere maximale Auslenkung erfährt die Saite im Bereich der ersten Überlagerung der beiden Teilwellen in Richtung A-Saite. Genauer gesagt ist dieser Punkt etwas unterhalb des Spiegelpunktes der Anzupfstelle bei einem Viertel der Saitenlänge ($\sim 26,6$ cm vom Sattel entfernt). In meinem beobachteten Fall, mit der Anzupfstärke *fortissimo*, ist die E-Saite sogar bis über die A-Seite geschwungen, ohne diese zu berühren. Die zweite maximale Auslenkung findet in etwa gespiegelt $\sim 30,4$ cm vom Steg entfernt statt (bei $\frac{2}{7}$ der Saitenlänge).

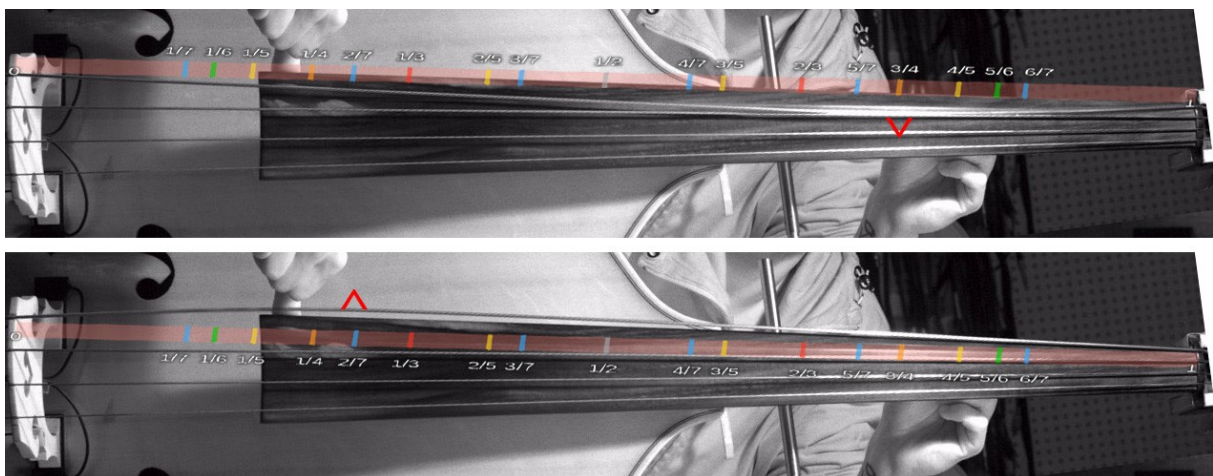


Abbildung 15: *Maximale Schwingungsauslenkung* (eigene Abb.)

Es macht den Anschein, als würden sich die beiden Teilwellen jedes Mal, wenn sie sich überlagern, ein Stück mehr in Richtung Saitenmitte verschieben. Da die Auslenkungen am **oberen und unteren Ende** annähernd **gleich groß** sind, nur in unterschiedliche Richtungen, kann man von zwei maximalen Amplituden sprechen. Allerdings liegt die Saite am oberen

Ende näher am Griffbrett. Deswegen kann unerwünschtes Scheppern oder Schnarren an dieser Position leichter auftreten. Schrägeres Anzupfen auf der E-Saite (annähernd parallel zur Saitenebene) verringert die Wahrscheinlichkeit von Saitenprellen. Allerdings ist das Saitenprellen bei gezupften Passagen in *fortissimo* oft auch ein Stilmittel und ein gewünschter Effekt.

3 Résumé und Fakten

Der Schwingungsvorgang der Saiten ist komplex und abhängig von mehreren unterschiedlichen Faktoren. Einer der bedeutendsten Auswirkungen entsteht durch den Bassspieler selbst, der den Auslenkungswinkel und die Stärke der Auslenkung bestimmt, bei gegriffenen Tönen auch den Dämpfungsgrad, Vibrato oder Glissando. Eine weitere Forschung zu dem Thema, speziell am Kontrabass, könnte noch viele weitere Zusammenhänge beleuchten und erklären.

- (1) Vom dem Punkt an dem die Saitenauslenkung stattgefunden hat, breiten sich **zwei entgegengesetzt laufende transversale Teilwellen** aus. An den **festen Enden** der Saite (Sattel oben und Steg unten) werden diese phasenversetzt reflektiert. Nach jeder Reflexion treffen sich die Teilwellen ein Stück näher in Richtung Saitenmitte.
- (2) Die maximale Saitenauslenkung ist oben in Richtung A-Saite und unten, allerdings in die andere Richtung, in etwa gleich groß. Die maximale Auslenkung der Saite bedeutet nicht die maximale Lautstärke.
- (3) Die Saitenschwingung ist ein **annähernd periodisches Signal**, dass zwar durch Dissipation und Strahlung an Energie verliert, aber bei dem aufeinanderfolgende Perioden einander stark ähneln.
- (4) Die Saite schwingt auf viele verschiedene Arten gleichzeitig. Es gibt longitudinale und transversale Wellen sowie die gleichzeitig schwingenden Obertöne. Dazu kommen vom Korpus und Steg übernommene und reflektierte Schwingungen.
- (5) Die Schwingungsebene ist in erster Linie von der Auslenkungsrichtung abhängig. Die relativ spitze Kurve auf der Ebene des Anschlags rundet sich mit der Zeit ab.
- (6) Dazu kommt, dass die **Ausbreitungsgeschwindigkeit frequenzabhängig ist**. Hochfrequente Signale laufen schneller als niederfrequente.

4 Bedeutung für die Griffbrettkrümmung

Interessanterweise schwingt die Saite auf dem oberen und unteren Bereich etwa gleich weit aus. Da das Griffbrett im Halsbereich schmaler wird, wirkt es optisch, als würde die Saite weiter oben eine größere Amplitude haben. Der Punkt mit der maximalen Ausdehnung im oberen Bereich des Griffbretts ist in etwa der **Spiegelpunkt der Anzupfstelle**.

Beobachtet man die Auslenkung der schwingenden E-Saite, kann man erkennen, wie gefährlich nahe die Saite an die A-Saite heranschwingt. Besonders eng an der A-Saite ist das im Bereich des **Kontra Gis** (quasi in der Gegend des 4. "Budes"). Somit ist diese Stelle (um das Gis) die heikelste beim Abrichten eines Griffbrettes. Da die Saiten am oberen Bereich des Halses im Vergleich zum unteren relativ nahe am Griffbrett sind, ist diese Stelle am meisten zum Saitenprellen gefährdet.

Um das Scharren der Saite am Griffbrett zu vermeiden, ist eine **konkave Krümmung** (Hohlkehle) über die gesamte Griffbrettlänge **unbedingt erforderlich**. Mittelpunkt der Hohlkehle ist laut Geigenbaumeister Richard Nupi Jenner die Hälfte der Griffbrettlänge, nicht die Hälfte der Mensur (Länge der schwingenden Saite). Das macht in Anbetracht meiner Forschungsarbeit durchaus Sinn, denn die Schwingungsauslenkung der Saite ist im oberen Bereich gleich groß wie im unteren, hat aber aufgrund der Bauform oben weniger Platz zum Schwingen. Da der Abstand zum Griffbrett im unteren Bereich sowieso Größer ist, ist die Verschiebung der Hohlkehle nach oben sinnvoll.

Bei Rockabillybässen mit **Nylonsaiten** oder Bässen mit **Darmsaiten** lässt man am **oberen Ende des Griffbretts zusätzlich eine Erhöhung von bis zu 4 Millimetern**, verteilt über die obersten 4 bis 6 Zentimeter des Griffbretts. Der Grund dafür ist, dass Nylon- und Darmsaiten eine geringere Spannung und beim Schwingen eine größere Amplitude als Stahlseiten haben. Somit braucht man eine höhere Saitenlage.

Die konkave Krümmung (Hohlkehle) des Griffbretts ist auch deswegen nötig, damit der zur Schwingung angeregte Teil der Saite mehr Platz für seine Bewegungen hat - egal welche Töne man gerade greift. Wichtig ist in erster Linie, dass die Hohlkehle **"gleichmäßig" konkav** ist. **Kleine Buckel**, von Zehntel Millimetern, können, wenn sie direkt hinter einem gegriffenen Ton liegen, Schnarrgeräusche verursachen. Deshalb sollte ein Griffbrett immer zuerst mit einem kleinen Hobel bearbeitet werden. Da eine niedrige Saitenlage, wie sie gerne von manchen Jazzern verwendet wird, das Problem des "Scheppers" zusätzlich verstärkt, ist das Abziehen/Abrichten eine sehr wichtige und sensible Aufgabe.

Ein Geigenbauer verwendet zum Abrichten des Griffbrettes in der Regel einen kleinen und sehr scharfen Hobel (ca. 15 cm), der äußerst fein eingestellt ist. Zur Korrektur und zur Kontrolle benötigt man ein langes gerades Lineal. Man legt es längs an das Griffbrett an und kann gut die Krümmung erkennen, wenn man gegen ein Licht schaut. Für die richtige Wölbung verwendet man Schablonen. Beim Feinschliff kann man sich mit einem längs gewölbten Schleifklotz behelfen, mit dem man schräg und großflächig über das Griffbrett schleift. Das fertige Griffbrett wird meistens geölt, in der Regel mit Leinöl.

Bei schlecht abgerichteten Griffbrettern schlägt vor allem die E-Saite im Halsbereich eher an das Griffbrett, als im unteren Bereich des Griffbretts. Es entsteht dort leicht ein Scheppern oder Schnarren. Wenn die Hohlkehle am tiefsten Punkt, tiefer als 2mm bis 3mm ist, kann - trotz flacher Saitenlage - das Greifen in den mittleren Lagen schnell zur Qual werden.

Anhang:

I Literatur- und Quellenverzeichnis

Gedan, Jörg: *Akustische Grundlagen der Musik*, Pian e forte 2003–2006
Online unter: <http://www.pian-e-forte.de/texte/>, Letzter Zugriff 19.11.2014

Jagdmann, Dirk: *Analyse und Resynthese des Gitarrenklangs*, Hamburg, Diplomarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften 2005

Sisera, Luca: *Die Kontrabassverstärkung, Tücken und Möglichkeiten*. Luzern: Diplomarbeit, Musikhochschule Fakultät III 2004
Online unter: http://www.geba-online.de/site.php?hl=Kontrabassverst%C3%A4rkung_-_Inhaltsverzeichnis&, Letzter Zugriff: 16.03.2014

Zollner, Manfred: *Physik der Elektrogitarre*, Regensburg 2009 (Vorveröffentlichung).
Online unter: <https://hps.hs-regensburg.de/~elektrogitarre/pdfs/kap8.pdf>, Letzter Zugriff: 16.03.2014

Meyer, Jürgen (translated by Uwe Hansen): *Acoustics and the Performance of Music (Fifth Edition)*, New York: SpringerScience + Business Media 2009, ISBN 978-0-387-09516-5

<http://www.geba-online.de> Gesellschaft der Bassisten in Deutschland
Letzter Zugriff 11.11.2014

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: <i>Hochgeschwindigkeits-kamera</i> (eigene Abb.).....	3
Abbildung 2: <i>Sinuswellen, Amplitude, Wellenlänge, Periode</i> (eigene Abb.)	6
Abbildung 3: <i>Reflexion stehender Transversalwellen</i> (eigene Abb.)	7
Abbildung 4: <i>Hüllenkurve einzelner Kontrabasstöne</i> , aufgenommen mit einem Kondensatormikrofon (DPA d:vote 4099B) (Eigene Abb.).....	9
Abbildung 5: <i>gleichzeitige Überlagerung der Teiltöne</i> (eigene Abb.)	10
Abbildung 6: <i>Schema einer Hüllenkurve</i> (eigene Abb.)	11
Abbildung 7: <i>Die gemessenen Signale eines Tones auf der E-Saite</i> (Abb. von Helmut Kühnelt, verwendetes Programm zur Analyse: Matlab)	13
Abbildung 8: <i>Beschleunigungssensor Trajektoriekurve, E-Saite, ganzer Ton</i> (Abb. von Helmut Kühnelt, verwendetes Programm zur Analyse: Matlab)	14
Abbildung 9: <i>Beschleunigungssensor Trajektoriekurve, E-Saite, Beginn des Schwingungsvorganges</i> (Abb. von Helmut Kühnelt, verwendetes Programm zur Analyse: Matlab)	15
Abbildung 10: <i>Beschleunigungssensor Trajektoriekurve, E-Saite, selber Ton stationär nach etwa 1,2 Sekunden Schwingungsdauer</i> (Abb. von Helmut Kühnelt, verwendetes Programm zur Analyse: Matlab)	16
Abbildung 11: <i>angenommener Schwingungsverlauf auf der Saitenebene</i> , Querschnitt durch das Griffbrett, bei einer herkömmlichen Saitenauslenkung in <i>fortissimo</i> (Eigene Abbildung).	16
Abbildung 12: <i>Screenshot aus dem bearbeiteten Video</i> (eigene Abb.)	18
Abbildung 13: <i>Schwingungsausbreitung der Teilwellen mit 87,763m/s</i> , Teil 1 (eigene Abb.	19
Abbildung 14: <i>Schwingungsausbreitung der Teilwellen mit 87,763m/s</i> , Teil 2 (eigene Abb.).....	20
Abbildung 15: <i>Maximale Schwingungsauslenkung</i> (eigene Abb.)	22

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: <i>Zusammenhänge</i> : die Frequenz ist mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit (c) mit ihrer Wellenlänge (λ) verknüpft.	6
---	---

IV Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift