

Gymnasium Nordhorn
Stadtring 29
48527 Nordhorn

Facharbeit im Leistungskurs Physik

Die Physik von Musikinstrumenten

Experiment: Klanganalyse verschiedener Musikinstrumente

Theoretische Behandlung der Spektren von Musikinstrumenten



Verfasser: Holger Weich

Fachlehrer: Herr Leutenantsmeyer

Zeitraum: 14.01. bis 28.02.2005

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	- 1 -
1.1. Aufgabenstellung.....	- 1 -
1.2. Einteilung der Musikinstrumente	- 2 -
2. Hauptteil	- 3 -
2.1. Physikalischer Hintergrund der Experimente	- 3 -
2.2. Erstes Experiment: Der stationäre Klang.....	- 6 -
2.2.1. Aufbau	- 6 -
2.2.2. Durchführung	- 7 -
2.2.3. Auswertung.....	- 8 -
2.2.4. Erklärung	- 17 -
2.2.5. Fehlerdiskussion.....	- 21 -
2.3. Weiterführende Untersuchungen an der Oboe.....	- 22 -
2.3.1. Das Überblasen.....	- 22 -
2.3.2. Bestimmung der Formanten	- 24 -
2.3.3. Doppelrohrblatt und Obertonreichtum	- 25 -
2.4. Zweites Experiment: Der Einschwingvorgang.....	- 26 -
2.4.1. Aufbau und Durchführung	- 27 -
2.4.2. Auswertung und Erklärung	- 27 -
2.4.3. Fehlerdiskussion.....	- 30 -
3. Schlussteil	- 31 -
3.1. Zusammenfassung	- 31 -
3.2. Rückblickende Betrachtung.....	- 31 -
3.3. Danksagung.....	- 32 -
4. Anhang	- 33 -
4.1. Schallwellen	- 33 -
4.2. Ton und Klang.....	- 34 -
4.3. Oboe, Violine, Flügelhorn und Stimmgabel.....	- 34 -
4.4. Zusammenhang zwischen Frequenz und Tonname	- 35 -
4.5. Jean Baptiste Joseph Fourier.....	- 36 -
4.6. Diagramme und Abbildungen	- 37 -
4.6.1. Frequenzspektren der Oboe	- 37 -
4.6.2. Einschwingvorgänge	- 41 -
4.7. Quellen- und Hilfsmittelverzeichnis	- 47 -

1. Einleitung

1.1. Aufgabenstellung

Im Saal kehrt Ruhe ein, mehr als 50 Musiker schauen angespannt zum Dirigenten und erwarten den Konzertbeginn. In der nächsten Sekunde wird der Saal in eine Vielzahl unterschiedlichster Klänge getaucht. Zur linken sind die Violinen zu sehen, nach rechts hin die größeren Streichinstrumente, hinten die Bläser und Schlagzeuger. Deutlich lassen sich die verschiedenen Instrumente heraushören: Das Schlagzeug gibt den Rhythmus an, die Bässe sorgen für die tiefen Töne, die Melodie kommt von den Violinen und den hohen Holzblasinstrumenten. Doch es lassen sich auch Klangunterschiede zwischen den Violinen und Oboen ausmachen, selbst dann, wenn sie dieselbe Melodie haben. Dabei spielen sie doch in derselben Tonhöhe, ja vielleicht sogar mit gleicher Lautstärke. Wodurch unterscheiden sie sich also?

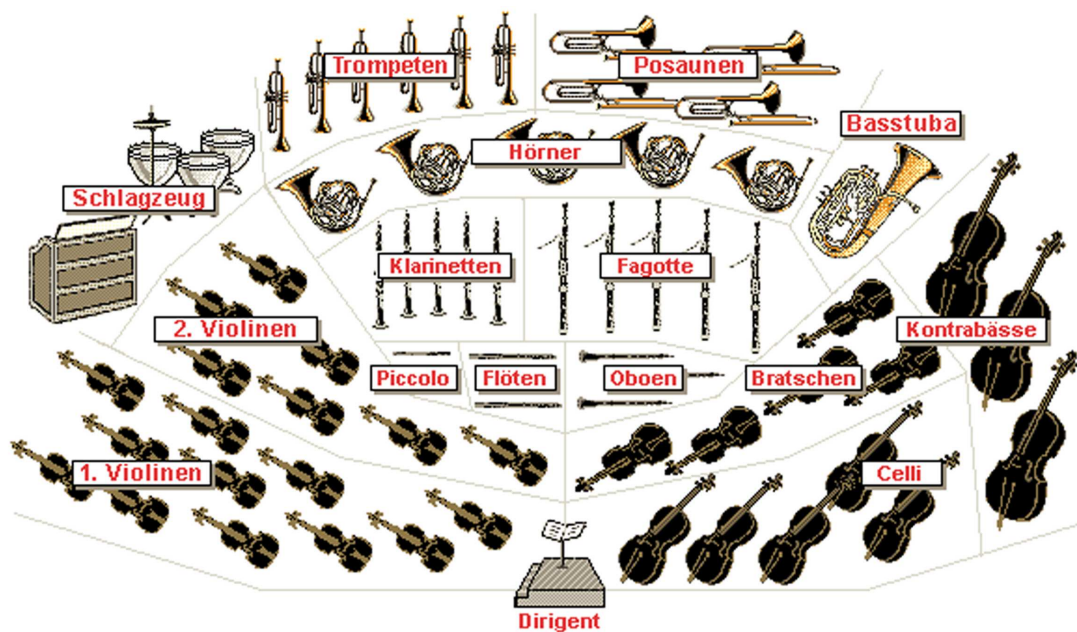


Abbildung 1: Das sinfonische Orchester¹

Mit dieser Fragestellung setzt sich diese Facharbeit zum Thema „Die Physik von Musikinstrumenten“ auseinander, die ich im Rahmen des Leistungskurses Physik erstellt habe.

Dabei werden insbesondere die beiden folgenden Aufgaben bearbeitet:

- Experiment: Klanganalyse verschiedener Musikinstrumente
- Theoretische Behandlung der Spektren von Musikinstrumenten

¹ Abbildung aus Microsoft® Encarta® Enzyklopädie Professional 2005

1.2. Einteilung der Musikinstrumente

Was ist eigentlich ein Musikinstrument? „Instrumentum“ ist das lateinische Wort für Werkzeug², unter einem Musikinstrument versteht man also ein Gerät, mit dessen Hilfe man Musik machen kann. Die freie Internet-Enzyklopädie Wikipedia beantwortet daher diese Frage so: „[J]eder Gegenstand, der Töne hervorbringt, [kann] als Musikinstrument dienen, jedoch wird der Ausdruck normalerweise nur für die Gegenstände verwendet, die zu diesem Zweck hergestellt oder verändert wurden.“³ Nach letzterer Definition gehören solche Grenzfälle wie zwitschernde Vögel, eine Hausecke, um die der Wind heult, klirrende Gläser o. ä. nicht zu den Musikinstrumenten.

Musikinstrumente lassen sich auf zwei unterschiedliche Arten einteilen: nach Art der Benutzung (für den Klang weniger wichtig) in Blasinstrumente, Streichinstrumente, Zupfinstrumente, Schlaginstrumente und Tasteninstrumente oder nach Art der Tonerzeugung. In dieser Facharbeit ist die Tonerzeugung von ausschlaggebender Bedeutung.

- Chordophone (Saiteninstrumente / Tonerzeugung durch Saiten)
 - Streichinstrumente wie die Violine
 - Zupfinstrumente wie die Gitarre
- Aerophone ("Luftklinger" / Tonerzeugung durch Luftstrom)
 - Blasinstrumente:
 - Blechblasinstrumente [wie das Flügelhorn]
 - Holzblasinstrumente [wie die Oboe]
 - Tasten-Aerophone:
 - Orgel
 - Harmonium,
 - Handzuginstrumente (Akkordeon und verwandte Instrumente)
- Membranophone ("Fellklinger" / Tonerzeugung durch schwingendes Fell)
- Idiophone ("Selbstklinger" / Tonerzeugung durch Klingen des gesamten Instruments)
[wie auch die Stimmgabel]
- Elektrophone (Elektronische Instrumente)

Tabelle 1: Einteilung der Musikinstrumente nach der Art der Tonerzeugung ⁴

² vgl. Stowasser S. 269

³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Musikinstrument> (15.01.2005)

⁴ <http://de.wikipedia.org/wiki/Musikinstrument> (15.01.2005)

Um die Untersuchungen möglichst vielfältig zu gestalten, werden mehrere Instrumente mit ganz unterschiedlicher Tonerzeugung analysiert: Oboe, Violine, Flügelhorn und Stimmgabel. Aus messtechnischen Gründen scheidet eine genaue Analyse derjenigen Instrumente aus, die einmal angeschlagen werden und dann ausklingen. An elektronischen Musikinstrumenten habe ich keine Messungen vorgenommen, da ihr Klang nicht auf natürlichem Wege, sondern durch Synthese erzeugt wird.

2. Hauptteil

Begriffe wie beispielsweise „Schallwellen“, „Auslenkung“, „Ton“ und „Klang“ werden in dieser Facharbeit als Fachbegriffe in ganz bestimmten Bedeutungen verwendet, die im Anhang ausführlich beschrieben werden. (Siehe Kapitel *4.1 Schallwellen* und *4.2 Ton und Klang!*)

2.1. Physikalischer Hintergrund der Experimente

Eine Sinus-Schwingung hat im Wesentlichen zwei Merkmale: ihre Periodenlänge T und ihre Amplitude s_{max} . „Die Amplitude ist [...] entscheidend für die Lautstärkeempfindung des Tones.“⁵ Der Kehrwert der Periodenlänge T ist die Frequenz f . Ihre Einheit „ist das Hertz (Hz). 1 Hz bedeutet eine Schwingung in der Sekunde“⁶. Die von Musikinstrumenten erzeugten Klänge sind aber keine reinen Sinustöne. Deshalb reicht es nicht aus, T und s_{max} anzugeben, sondern der genaue Zusammenhang zwischen der Zeit t und der Auslenkung s muss gemessen und analysiert werden. Das s - t -Diagramm in Abbildung 2 verdeutlicht anhand von drei Messkurven, wie komplex die Klänge von Musikinstrumenten im Vergleich zu reinen Sinus-Schwingungen sind.

⁵ Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 20

⁶ Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 20

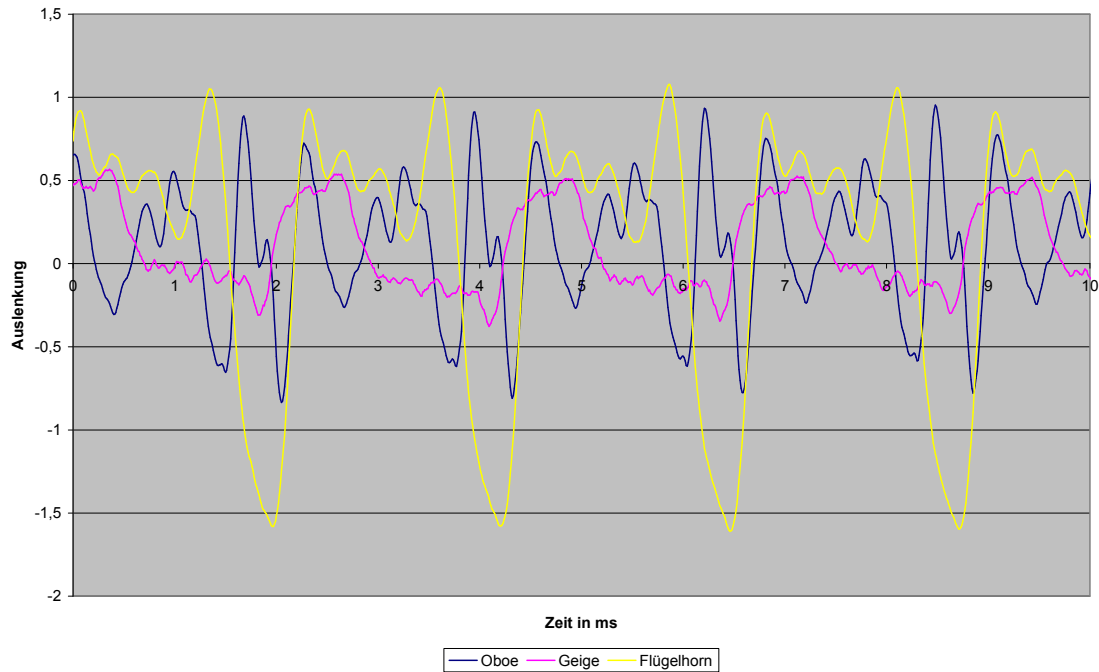


Abbildung 2: s - t -Diagramm vom Kammerton a'

Alle drei Kurven haben zwar nahezu dieselbe Periodenlänge T , unterscheiden sich aber ansonsten völlig voneinander. Jedes Musikinstrument hat seine eigene Klangfarbe, die sich aus der Kurvenform ergibt. Dennoch kann man sich beim Betrachten der Kurven keinen Klang vorstellen. Eine objektive Analysemöglichkeit fand der französische Mathematiker und Physiker Jean Baptiste Joseph Fourier (siehe Kapitel 4.5 im Anhang!). Er stellte 1822 in „Théorie analytique de la chaleur“ („Analytische Theorie der Wärme“) fest: „Durch einfache Summierung einer Konstanten und von Cosinus- und Sinus-Schwingungen lässt sich jede beliebige periodische Funktion $f(x)$ beliebig genau annähern.“⁷ In der nach Fourier benannten Fourieranalyse zerlegt man eine beliebige Schwingung in die einzelnen reinen Sinus-Schwingungen. Dazu wendet man ein mathematisches Verfahren an, die sogenannte Fourier-Transformation. Da ihre Behandlung Kenntnisse im Rechnen mit komplexen Zahlen und andere über die Schulmathematik weit hinausgehende Zusammenhänge voraussetzt, wird an dieser Stelle auf eine Herleitung verzichtet.

⁷ http://www.miszalok.de/Lectures/L8_Fourier/Fourier_deutsch.htm (29.01.2005)

Wie die Fourieranalyse abläuft, wird im Folgenden anhand eines Beispiels erläutert:

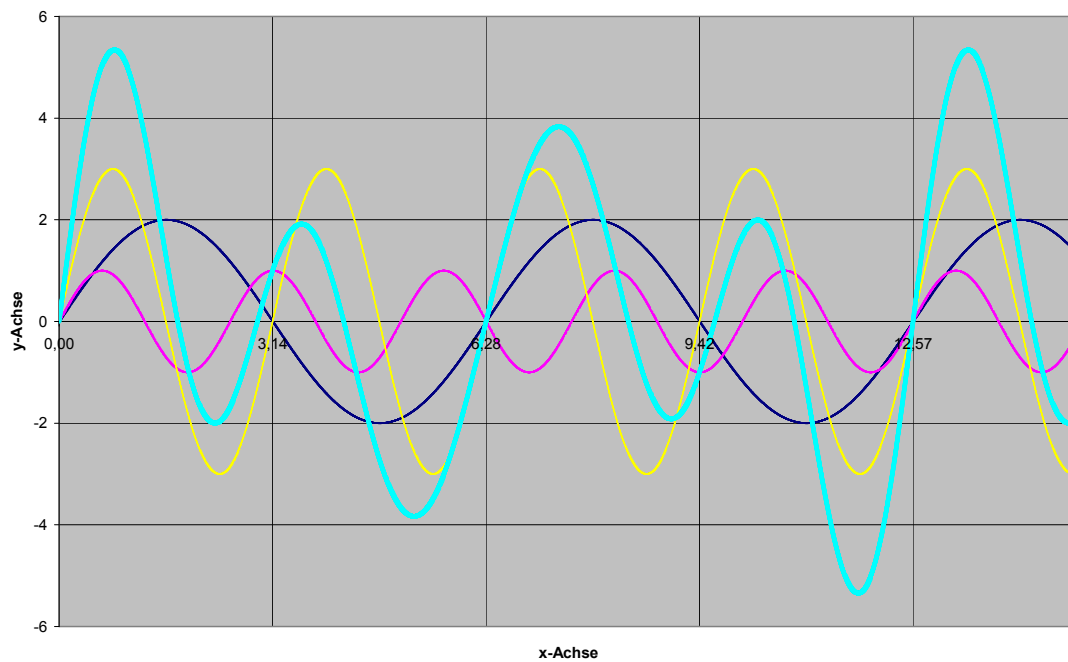


Abbildung 3: Beispiel zur Fourieranalyse

Soll die türkise Kurve (●) in ihre Einzelbestandteile zerlegt werden, so errechnen sich per Fourier-Transformation die drei anderen eingezeichneten Kurven (●●●):

(●) $y = 2 * \sin(x)$

(●) $y = \sin(2,5x)$

(●) $y = 3 * \sin(2x)$

Anschließend wird nun jeder Frequenz eine Amplitude zugeordnet:

(●) $T = 2\pi$
 $f = \frac{1}{2\pi}$
 $s_{\max} = 2$

(●) $T = 0,8\pi$
 $f = \frac{1}{0,8\pi}$
 $s_{\max} = 1$

(●) $T = \pi$
 $f = \frac{1}{\pi}$
 $s_{\max} = 3$

Im letzten Schritt wird in einem Diagramm auf die x-Achse der zu untersuchende Frequenzbereich, auf die y-Achse die Amplitude aufgetragen. In diesem Beispiel ergibt sich folgendes Diagramm:

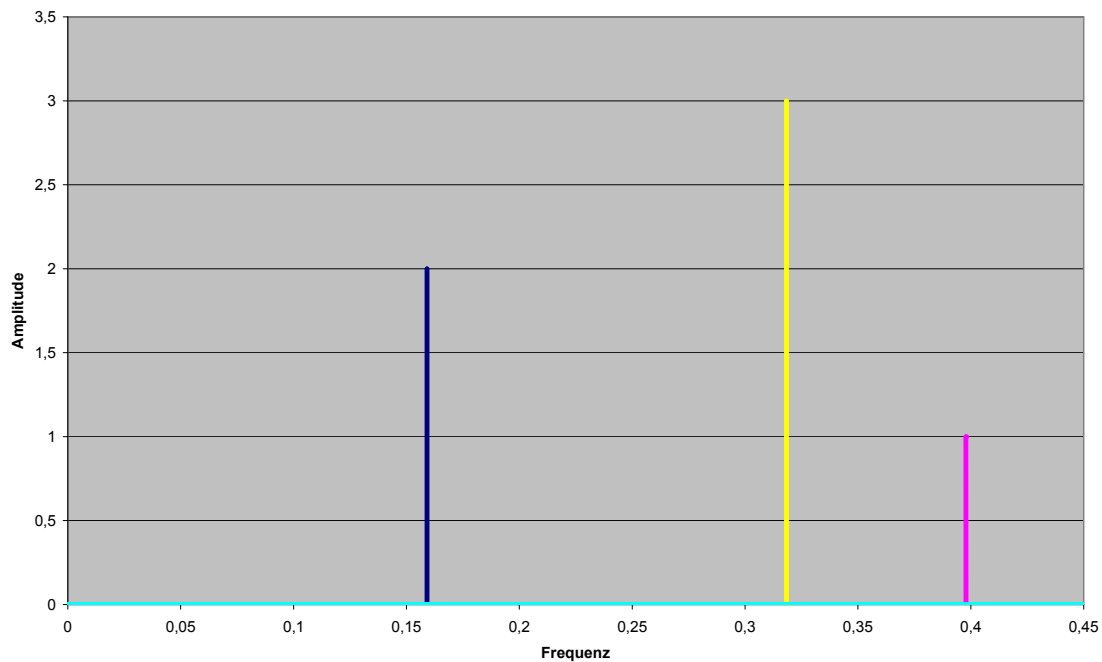


Abbildung 4: Frequenzspektrum zur Beispielfunktion aus Abbildung 3

Daraus kann man nun ablesen, wie stark welche Frequenz am Aufbau der Gesamtschwingung beteiligt ist. Bei den untersuchten Klängen von Musikinstrumenten handelt es sich um kompliziertere Kurven, die sich aus viel mehr Sinuskurven zusammensetzen und entsprechend mehr Linien im Diagramm ergeben.

Zusätzliche Phasenverschiebungen, die in diesem einfachen Beispiel weggelassen wurden, beeinflussen das Analyseergebnis nicht.

2.2. Erstes Experiment: Der stationäre Klang

2.2.1. Aufbau

Das Universalmikrofon zum Aufzeichnen des Schalls wird mit dem Sensor-CASSY verbunden. Dieses ist an einen PC angeschlossen, auf dem die Software „CASSY Lab“ zur Aufnahme und Verarbeitung der Daten läuft.

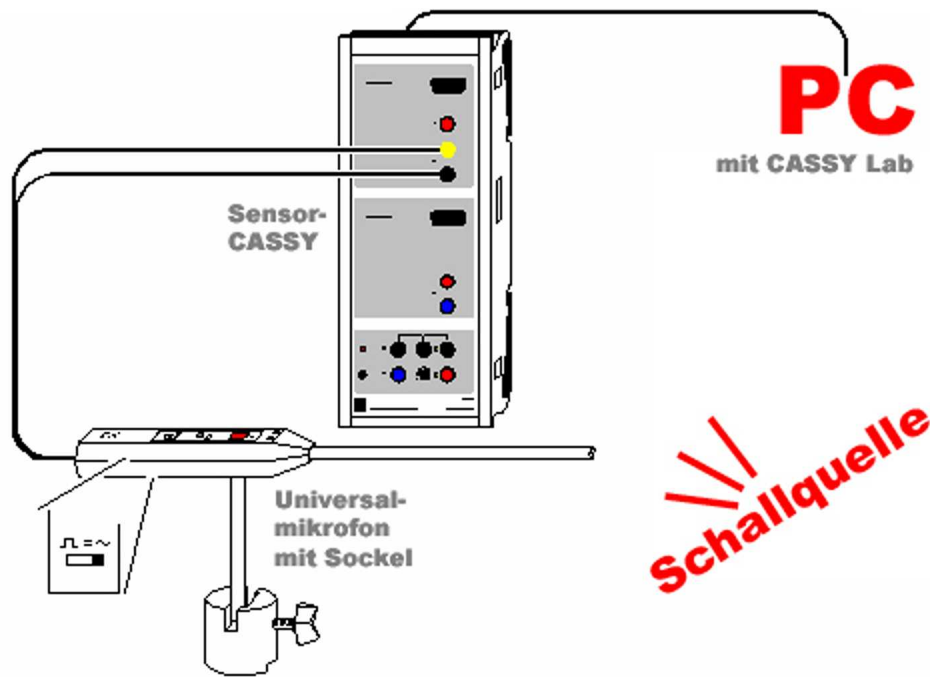


Abbildung 5: Skizze zum Versuchaufbau ⁸

2.2.2. Durchführung

Als Schallquelle dienen eine Oboe (gespielt von mir selbst), eine Violine (gespielt von Claudia Weich) und ein Flügelhorn (gespielt von Hermann Hamel) sowie eine Stimmgabel. Bei den drei erstgenannten Musikinstrumenten hat der Spieler sehr starken Einfluss auf die Klangfarbe und/oder sie ändert sich mit der Dynamik. Um den Rahmen der Facharbeit nicht zu sprengen, wird jeweils nur „ein ganz normaler Klang“ (ohne gezielte Klangfarbenbeeinflussung durch den Spieler) analysiert. Nähere Informationen zu den verwendeten Musikinstrumenten findet man im Anhang im Kapitel 4.3 *Oboe, Violine, Flügelhorn und Stimmgabel*. Das Mikrofon muss jeweils in der Empfindlichkeit an die Lautstärke der Instrumente angepasst werden, um einerseits deutliche Signale zu erhalten und um andererseits Übersteuerungen zu vermeiden. Diese Unterschiede in der Empfindlichkeitseinstellung werden in der Auswertung durch Multiplikation der Messwerte mit einem entsprechenden Faktor korrigiert.

Während ein Klang gehalten wird, wird die lediglich 160 ms lange Messung mit 16000 Messwerten (Messintervall: 10 μ s) per Tastendruck gestartet. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass es nicht durch den Einschwingvorgang zu Verfälschungen kommt, sondern wirklich nur ein Teil des stationären (gleich bleibenden) Klanges analysiert wird. Die Fourieranalyse wird direkt von der Software *CASSY Lab* durchgeführt, die

⁸ Bildmaterial aus der Anleitung zu CASSY-Lab

Daten nach Microsoft Excel 2002 zur weiteren Auswertung und Diagrammerstellung exportiert. Zum Klangvergleich dienen die Töne c', a' und c''', wobei letzterer ausschließlich dem Vergleich zwischen Oboe und Violine vorbehalten ist, denn er ist zu hoch für das Flügelhorn. Die Stimmgabel erzeugt natürlich nur den Ton a'.

2.2.3. Auswertung

Eine Dimension lässt sich für die Auslenkung/Amplitude nicht angeben, da mit der verwendeten Anordnung keine absolute Lautstärkemessung möglich ist. Für den stationären Klang eines c' bei den drei Instrumenten werden jeweils sieben Messungen angestellt und die typischste Messung ausgewählt. Der Versuch, aus diesen sieben Messungen einen Durchschnitt zu bilden, erweist sich als unsinnig, da sich durch Phasenverschiebung eine völlig verfälschte *s-t*-Kurve ergeben würde und außerdem bei kleinen Tonhöhendifferenzen die Linien im Frequenzspektrum besonders im hohen Bereich nicht aufeinander fallen, sondern Mehrfachspitzen ergeben würden, also einen Klang zeigen, den das Instrument so niemals hervorbringen würde.

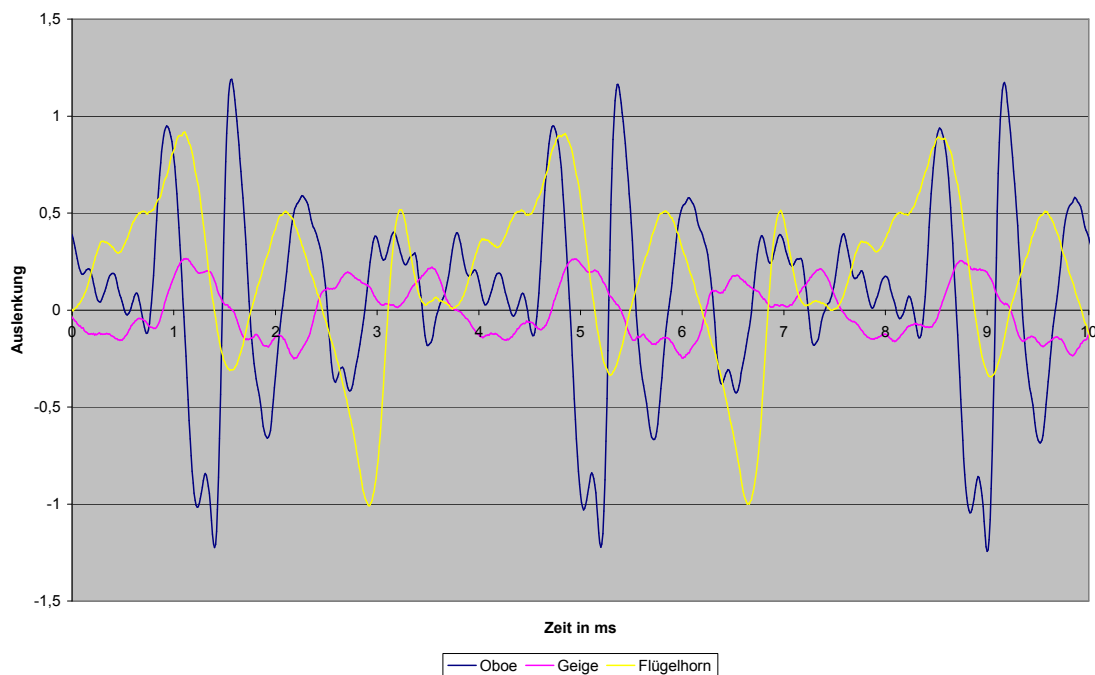


Abbildung 6: *s-t*-Diagramm beim c'

Eine genaue Betrachtung der Kurven aus diesem 10-ms-Ausschnitt führt zu der Erkenntnis: Die Schwingungskurve eines jeden Instrumentes hat eine charakteristische, ständig wiederkehrende Form mit gleicher Periodenlänge $T = \frac{1}{f} \approx \frac{1}{261,6\text{Hz}} \approx 3,8\text{ms}$.

In den Frequenzspektren werden jeweils die Maxima der Spitzen ab einer Amplitude von 0,01 mit kleinen Querstrichen versehen, damit auch die Höhen der verdeckten Spitzen erkennbar sind.

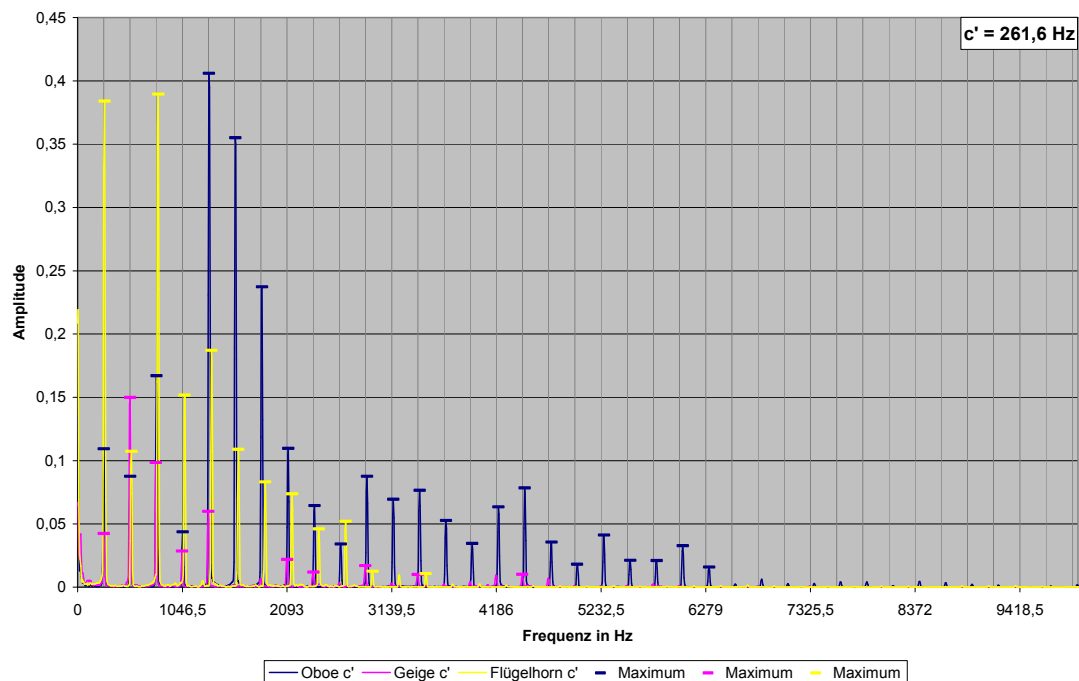


Abbildung 7: Frequenzspektren beim c'

Neben der Grundschwingung mit rund 261,6 Hz erkennt man sehr viele weitere Schwingungen mit ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz im Klang der Musikinstrumente. Diese Schwingungen werden (harmonische) Obertöne genannt. Das Frequenzspektrum gibt einem einen guten Überblick über die Intensität und Verteilung der Obertöne, da „die Klangempfindung abhängig ist von Zahl, relativer Stärke und Verteilung der einem Grundton beigemischten Obertöne.“⁹ Der Grundton und seine Obertöne zusammen genommen sind die Harmonischen (auch Partial- oder Teiltöne genannt). „Im Allgemeinen kann man sagen, dass obertonarme Klänge dumpf, stumpf, reizlos sind. Überwiegen die tieferen Teiltöne, so wirkt der Klang als weich, treten höhere hinzu, so wird er schärfer und brillanter. Beim Überwiegen höherer und höchster Komponenten wird der Klang rau, scharf durchdringend.“¹⁰ Es handelt sich bei den höheren Teiltönen nur bei den Zweier-Potenzen der Grundfrequenz um Oktaven (Doppel-/Dreifach-/...-Oktaven) des Grundtones, also bei der zweiten, vierten, achten usw. Harmonischen. Die dritte Harmonische ist die Quinte der zweiten (Verhältnis 3:2),

⁹ Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 39

¹⁰ Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 42

also die Duodecime des Grundtones. Die fünfte Harmonische ist die große Terz der Doppeloktave, die sechste Harmonische die Quint der Doppeloktave.¹¹ Die musikalischen Intervalle der höheren Obertöne werden also mit zunehmender Höhe immer geringer. Dies zeigt auch das Diagramm mit logarithmischer Frequenz-Skala, wie es auch dem Höreindruck entspricht: Wir nehmen z. B. ein Oktavintervall immer als gleich groß wahr. Wir wissen aber, dass jede Oktave die doppelte Schwingungszahl wie die nächsttiefere besitzt. Das a' beispielsweise besitzt eine Frequenz von 440 Hz, das a'' also 880 Hz, das a''' 1760 Hz. Das vom a' ausgehende Oktavintervall umfasst eine Frequenzerhöhung von 440 Hz, das vom a'' bis zum a''' aber bereits 880 Hz.¹² Mit steigender Tonhöhe wird also der Frequenzunterschied für dasselbe Intervall immer größer. Diesen Effekt gleicht eine logarithmische Einteilung dem Höreindruck entsprechend aus. Im Diagramm sind die Abstände zwischen Grundton, zweiter, vierter, achter usw. Harmonischer stets gleich groß.

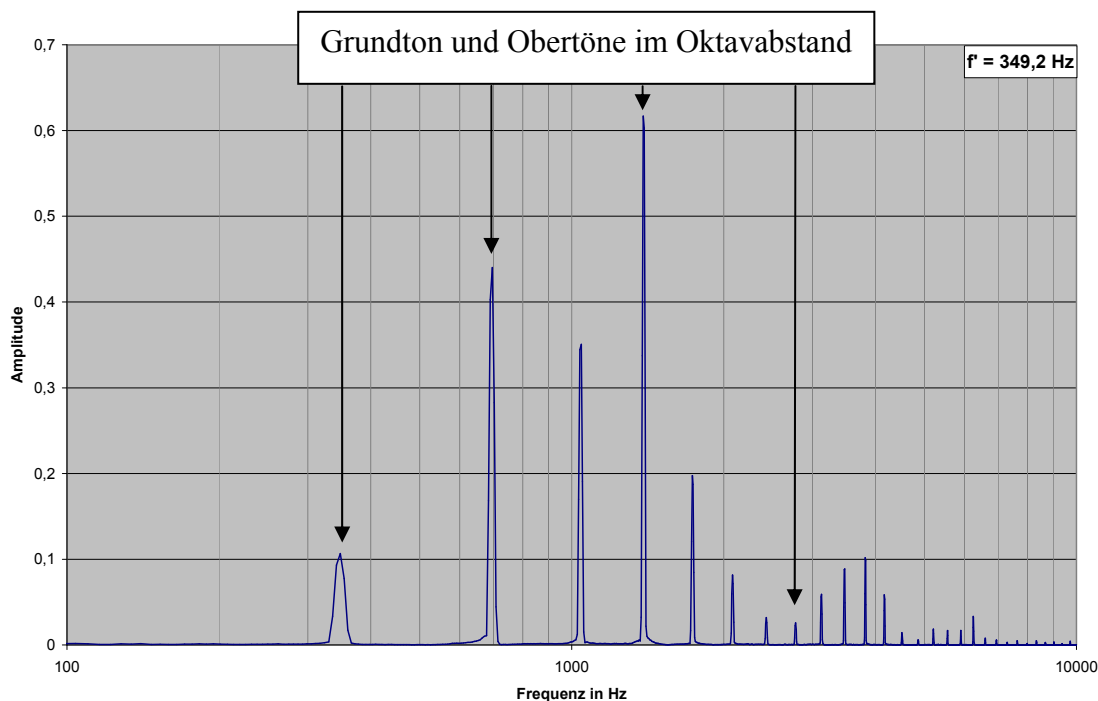


Abbildung 8: Logarithmische Darstellung des Frequenzspektrums der Oboe beim f'

Trotzdem werden in der Analyse lineare Skalen verwendet, da sich Zusammenhänge leichter erkennen lassen und Details auch im hohen Frequenzbereich erkennbar bleiben.

¹¹ vgl. Müller-Pouillet: Lehrbuch der Physik S. 807

¹² vgl. Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 36-37

Zur Verdeutlichung der Nomenklatur folgt als Beispiel das Frequenzspektrum der Oboe beim Kammerton a'. Die Bezeichnung Partialton oder Teilton kann als gleichwertiges Synonym für die Harmonischen gebraucht werden.

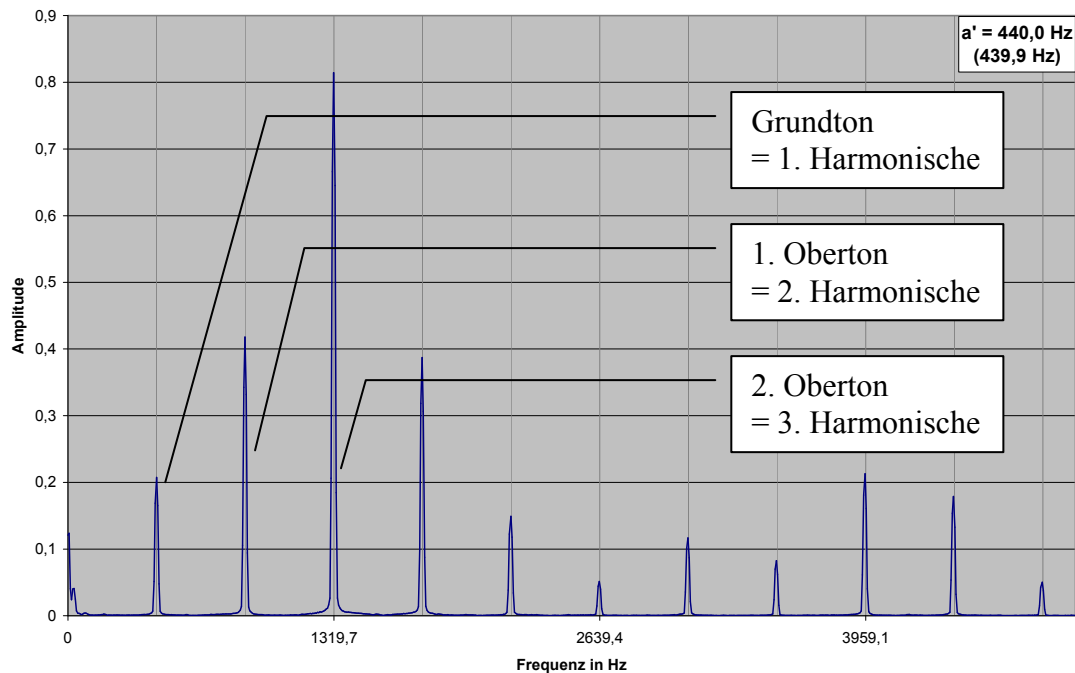


Abbildung 9: Frequenzspektrum der Oboe beim a'

Die Frequenzangabe in Klammern rechts oben im Diagramm entspricht der tatsächlich gemessenen Tonhöhe (439,9 Hz). Eine so geringe Abweichung könnte bei der Grundfrequenz gar nicht gemessen werden, aber die Abweichung von einem Zehntel Hertz bei der Grundschiwingung bedeutet eine Abweichung um 1 Hz bei der zehnten Harmonischen. Darin zeigt sich, wie wichtig die Obertöne fürs Hören sind: kleinste Differenzen lassen sich im höheren Obertonbereich leichter ausmachen, da sie dort größer sind (10-facher Frequenzabstand bei nur drei- bis vierfachem gehörtem Frequenzabstand pro gleich empfundenem Intervall) und darüber hinaus in einem für den Menschen empfindlicheren Bereich liegen. Das sind einige der Gründe, warum man ein obertonreiches Instrument als Stimmungsinstrument für ein Orchester nimmt. Der Hauptgrund aber ist, dass sich ein obertonreiches Instrument gut durchsetzen kann. Selbst wenn seine niedrigen Harmonischen von sehr vielen Instrumenten überdeckt werden, kann der Zuhörer seinen Klang im hohen Frequenzbereich wahrnehmen und quasi auf die Grundfrequenz zurückrechnen. Dies ist auch schon eine weitere Aufgabe der Obertöne: Selbst wenn der Grundton nicht hörbar ist, erschließt das menschliche Gehör aus den Obertönen den Grundton, wie ein zusätzlicher Telefon-Heimversuch

zeigt: Am heimischen PC wird ein von der Oboe gespieltes b (233,1 Hz) einmal direkt und einmal übers Telefon aufgezeichnet und mit dem Programm Audio Tester V 1.3 ausgewertet: Die rote Kurve zeigt das Hintergrundrauschen, das vom Mikrophon verursacht wird, die blaue den direkt aufgezeichneten Klang, die grüne den übers Telefon übertragenen Klang. Die größere Breite der Spitzen entsteht erstens, weil das Mikrophon bei diesem Heimversuch dem im Schulexperiment verwendeten qualitativ unterlegen ist, und zweitens durch die rechnerische Methode der Auswertung.

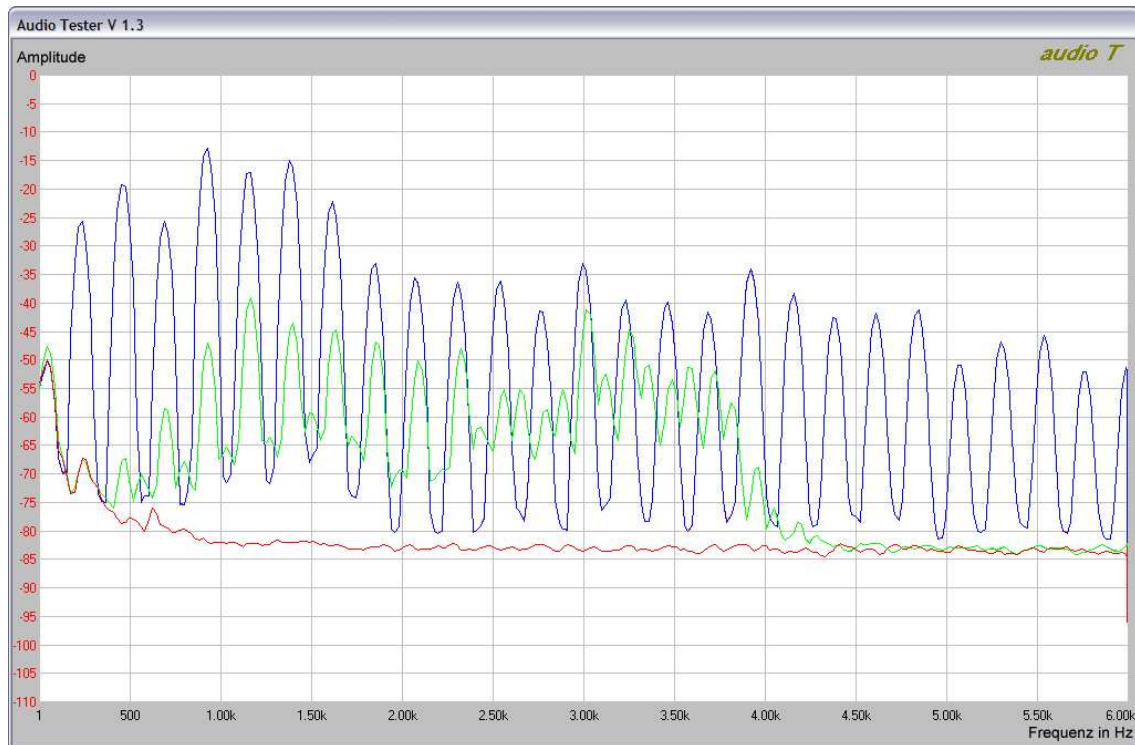


Abbildung 10: Frequenzspektren des Telefon-Heimversuchs

Die Tonhöhe wird auch bei telefonischer Übertragung richtig wahrgenommen und auch der Klang der Oboe wird richtig identifiziert, wenngleich ein wenig verfälscht (wirkt deutlich leerer). Auffällig ist, dass der Klang übers Telefon ab einer Frequenz von etwa 4 kHz vollständig abgeschnitten wird, dass der Rauschcharakter übers Telefon stärker ist (die Minima sind höher), und dass die Lautstärke insgesamt niedriger ist (die Maxima sind tiefer). Bei genauer Betrachtung der grünen Kurve fallen Zwischenmaxima in den eigentlichen Minima auf. Zurückgerechnet auf den Grundton ergeben diese einen Klang mit einer Grundfrequenz von 231,5 Hz oder – wenn sie sich auch in den Spitzen des b-Klanges verbergen – mit einer Grundfrequenz von 119 Hz. Dies ist als Störklang des Telefons zu deuten. Worauf dieser Versuch eigentlich abzielt: Die Grundfrequenz von 233,1 Hz fällt bei der Übertragung durchs Telefon dem

Abschneiden im tiefen Bereich zum Opfer (die grüne Kurve fällt unter einer Frequenz von etwa 400 Hz mit der roten Kurve zusammen), der Grundton ist bei der Wiedergabe im Telefonhörer also nicht vorhanden. Trotzdem wurde die richtige Tonhöhe identifiziert. Der Hörer muss also quasi automatisch von den vorhandenen Obertönen auf die Grundfrequenz schließen, indem er sozusagen den größten gemeinsamen Teiler der Obertonfrequenzen bestimmt. D. h. selbst wenn die niedrigen Harmonischen übertönt werden, kann man ein Instrument heraushören, wenn man die hohen Obertöne wahrnimmt. Im Frequenzspektrum des c' (siehe Abbildung 7!) ist erkennbar, dass sich die Oboe vom fünften bis zum 24. (!) Oberton deutlich abheben kann. Das ist der Grund, weshalb sich eine Oboe im Orchester gegen mehr als 20 Violinen durchsetzen kann. Das Flügelhorn ist hingegen bei der Grundfrequenz und der dritten Harmonischen sehr stark. Die Violine ist insgesamt deutlich leiser. Sie hat aber trotzdem eine relativ obertonstarke Klangfarbe, besonders durch den ersten Oberton. So macht der Grundton bei der Violine rund 6,8% vom Gesamtklang aus (Oboe: 4,5%, Flügelhorn: 21%), der erste Oberton dagegen 20,5% (Oboe: 3,7%, Flügelhorn: 6,0%).

Nun betrachten wir den Frequenzbereich von 10000 Hz bis 25000 Hz beim c':

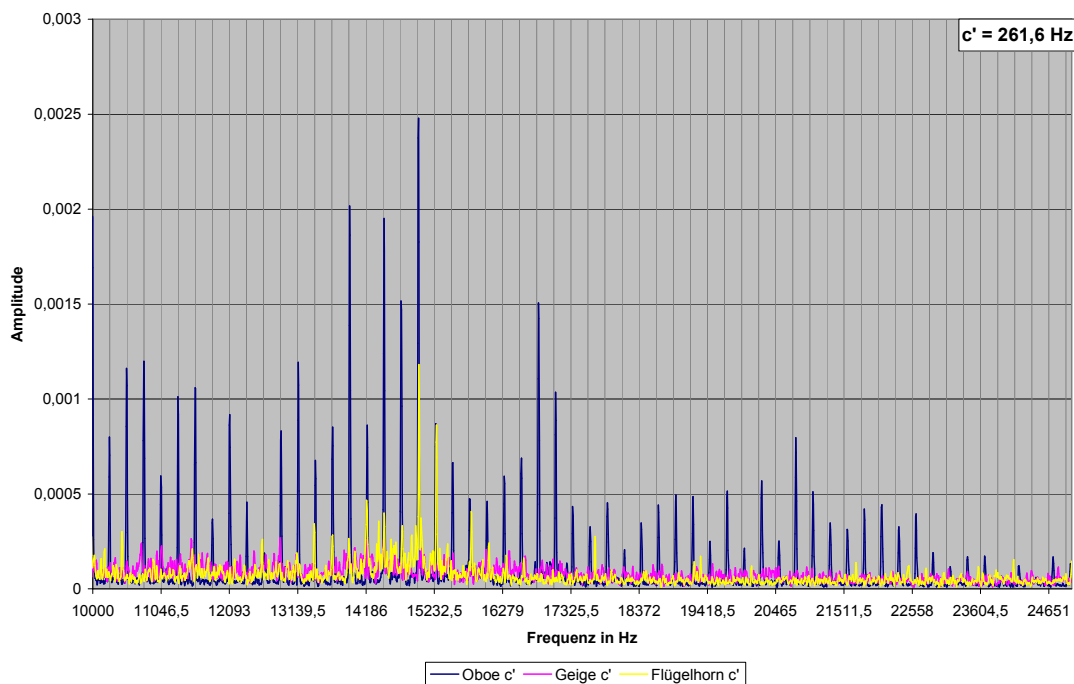


Abbildung 11: Frequenzspektren beim c' von 10000 Hz bis 25000 Hz

Zwar sind auch im Bereich von über 10000 Hz noch sehr ausgeprägte Obertöne zu messen (vor allem bei der Oboe), doch ist deren Amplitude (Achsenkalierung beachten!) sehr viel geringer als die der niedrigen Teiltöne und ihre Frequenz so hoch, dass

sie vom menschlichen Ohr kaum oder gar nicht wahrgenommen werden können, also kaum Einfluss auf den Klang haben. Deshalb liegt der Schwerpunkt der graphischen Auswertung im unteren Frequenzbereich.

Neben der Wirkung auf den Klang haben diese hohen Teiltöne auch Folgen für den Musiker: Es erfordert Energie, Schwingungen, die einer Dämpfung unterliegen, aufrecht zu erhalten. Weil die Energie eines schwingenden Systems proportional zum Frequenzquadrat ist, benötigen gerade hohe Frequenzen viel Energie. Daraus kann man schließen, dass ein Oboist für den Ton deutlich mehr Energie aufwenden muss als ein Violinenspieler. Dies geschieht vor allem durch den sehr hohen Luftdruck beim Spielen.

Beim Flügelhorn fällt die verstärkte Teiltonintensität im Bereich um die 15 kHz auf, die nur durch mir unbekannte, konstruktionsbedingte Effekte erklärt werden könnte, denn sie ist auch bei den anderen c' -Messungen zu finden, die hier nicht dargestellt sind. Allerdings ist dieser Frequenzbereich beim a' des Flügelhorns nicht hervorgehoben.

Die nächste Messreihe behandelt das a' (440 Hz). Wieder wurde bei jedem der drei Musikinstrumente aus sieben Messungen die am meisten typisch wirkende Messung ausgewählt. Der Kammerton a' bietet die Möglichkeit, die Stimmgabel in den Vergleich mit einzubeziehen.

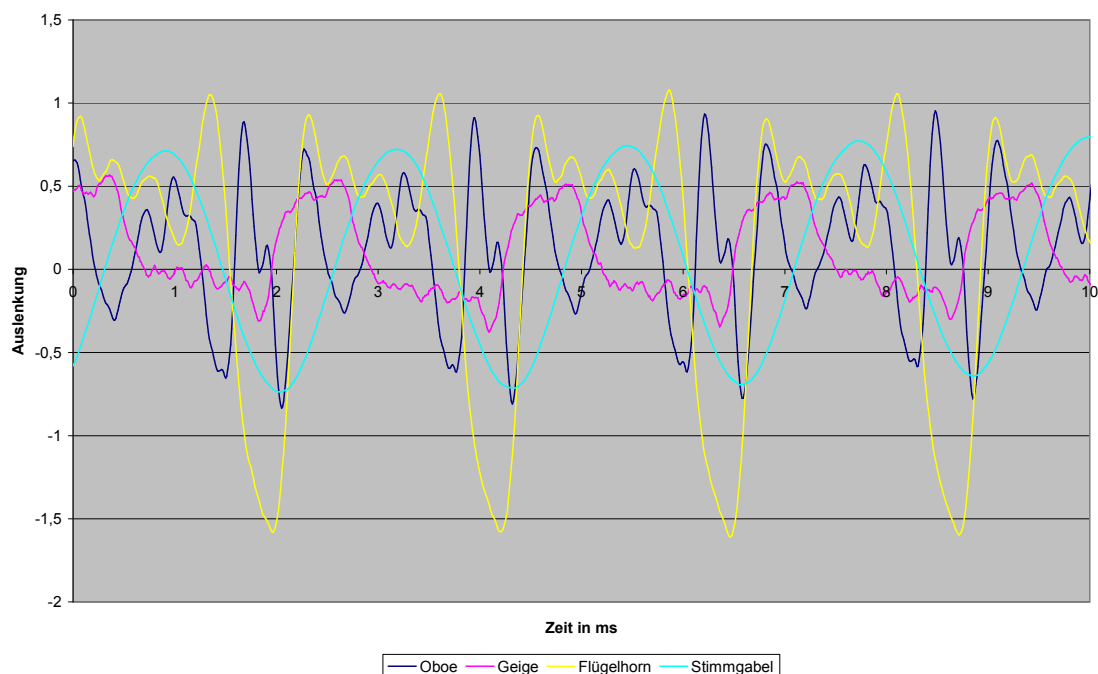


Abbildung 12: s - t -Diagramm beim a'

Die berechnete Periodenlänge $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{440\text{Hz}} \approx 2,27\text{ms}$ ist im Diagramm bei allen

vier Instrumenten verifizierbar. Weiterhin fällt auf, dass die Kurven deutlich anders aussehen als beim c', sich die Violin-Kurve aber trotzdem in ähnlicher Weise wie beim c' von den beiden Blasinstrument-Kurven abhebt. Die Kurve der Stimmgabel gleicht einer Sinus-Schwingung. Ihre Amplitude (also damit auch ihre Lautstärke) ist sehr stark davon abhängig, wo gemessen wird: Im Hohlraum des Resonanzkastens ist der Ton deutlich am lautesten.

Ein Blick auf das Frequenzspektrum zeigt ein ähnliches Bild wie beim c':

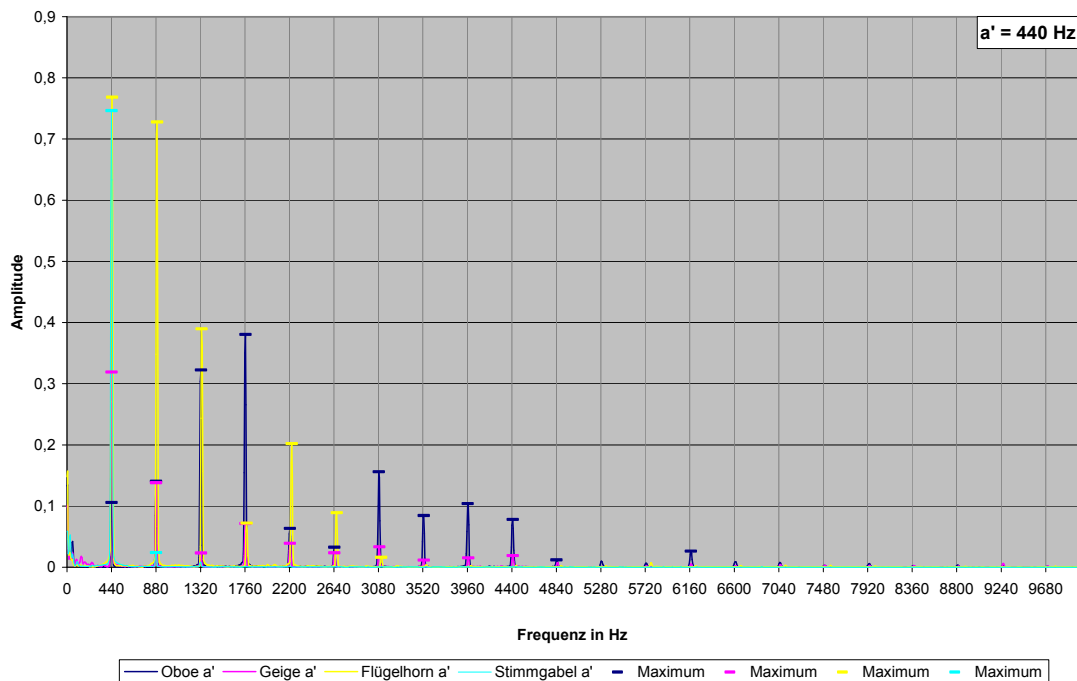


Abbildung 13: Frequenzspektren beim a'

Im Grundton und dem ersten Oberton dominiert das Flügelhorn mit einer immensen Lautstärke, die sogar die beim c' gemessene übertrifft (y-Achsenskalierung beachten, reicht doppelt so hoch wie in Abbildung 7). Den Oboenklang bestimmen hauptsächlich seine Obertöne höherer Ordnung. Beim Violinenklang ist der Grundton diesmal am stärksten. Der Klang der Stimmgabel besteht fast nur aus der Grundschwingung. Die Harmonischen sind so schwach ausgeprägt, dass man hier von einem Sinuston sprechen kann.

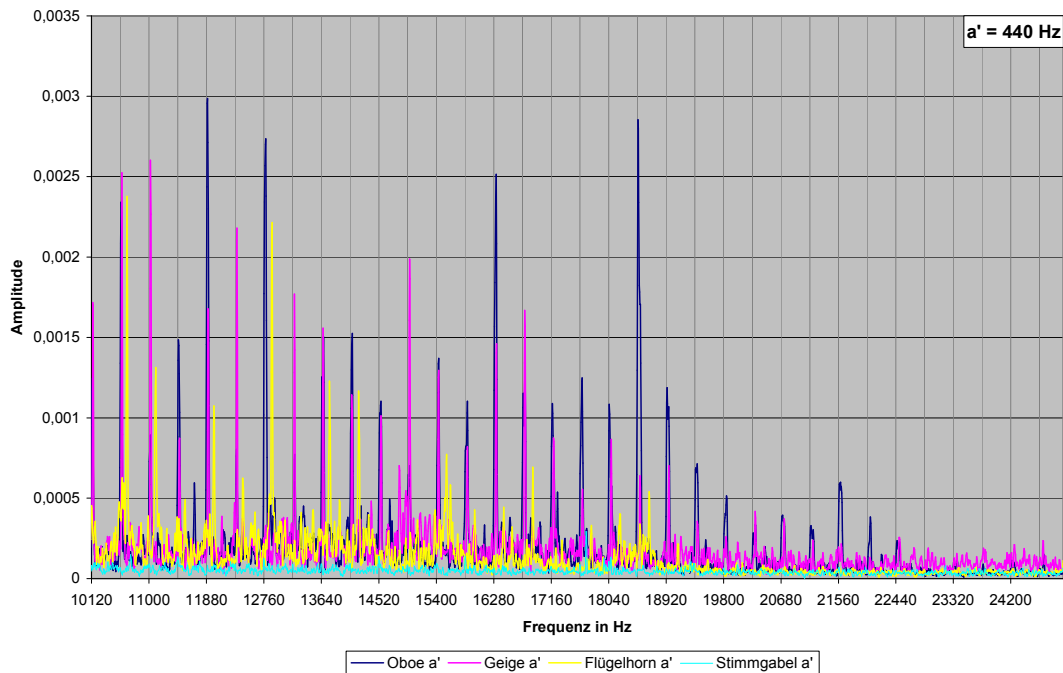


Abbildung 14: Frequenzspektren beim a' von 10120 Hz bis 25000 Hz

Beim a' besitzen alle drei Instrumente Obertöne bis in den zweistelligen kHz-Bereich hinein, jedoch – wie beim c' – mit minimaler Amplitude, sodass sie den Klang kaum beeinflussen.

Die dritte Messreihe zum stationären Klang betrifft nur Oboe und Violine, da der Ton c''' (1046,5 Hz) für eine Analyse des Flügelhornklangs zu hoch war.

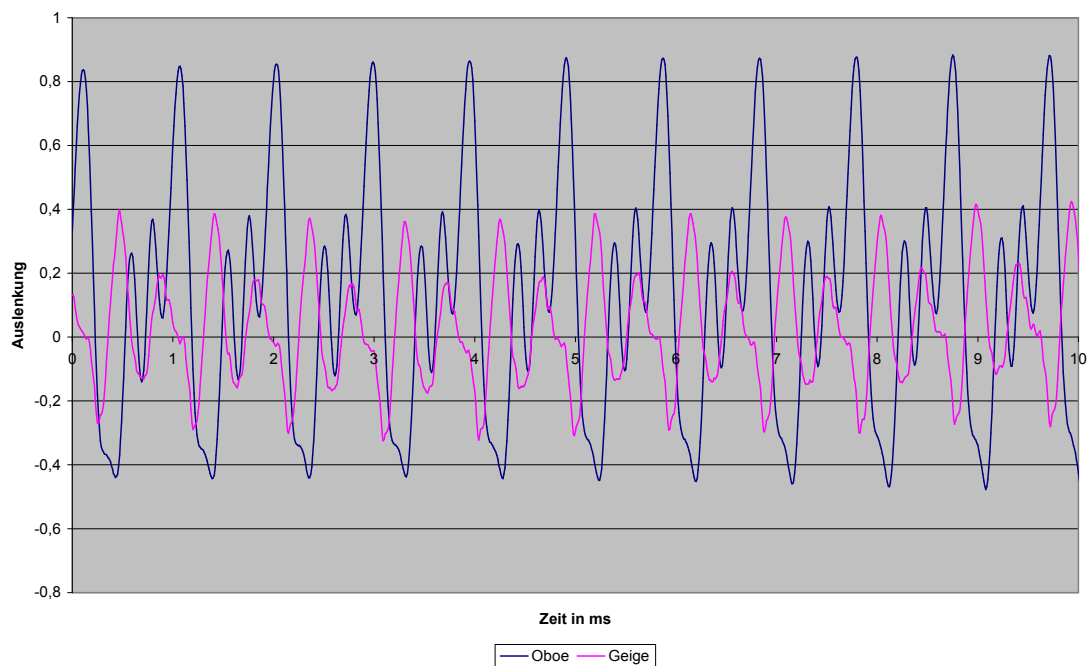


Abbildung 15: s-t-Diagramm beim c'''

Wieder sind deutlich verschiedene Kurvenformen mit zusätzlich verminderter

Periodenlänge $T = \frac{1}{f} \approx \frac{1}{1046,5\text{Hz}} \approx 0,96\text{ms}$ zu erkennen.

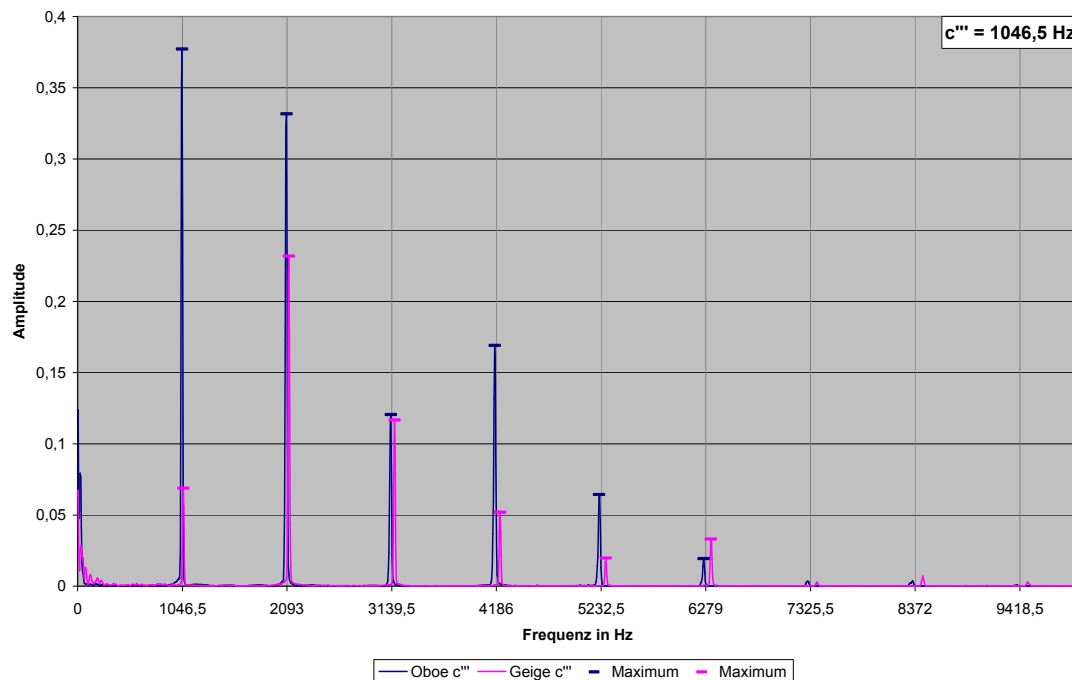


Abbildung 16: Frequenzspektrn beim c'''

Das Spektrum zeigt einen deutlich veränderten Klang bei der Oboe: Der Grundton ist die stärkste Harmonische und die Intensität fällt mit zunehmender Ordnung rasch ab. Bei der Violine entsteht eher ein mit dem Frequenzspektrum des c' vergleichbares Bild: Besonders der erste Oberton tritt stark hervor. Was schon die Amplituden im s - t -Diagramm erkennen lassen, wird im Frequenzspektrum ganz offensichtlich: Die Oboe ist deutlich lauter als die Violine.

2.2.4. Erklärung

Oboe: Die Klangunterschiede sind auf die verschiedene Art der Klangerzeugung zurückzuführen. Die Bezeichnung Doppelrohrblattinstrument lässt schon erschließen, wie ein Oboenklang erzeugt wird: Das Mundstück besteht aus zwei eng aneinanderliegenden Rohrblättern (Material: Rohr der Riesenschilfart *Arundo Donax*), zwischen denen der Spieler Luft mit hohem Druck durchbläst. Dabei öffnet und schließt sich der kleine Spalt sehr schnell. Die Energie wird stoßweise auf die Luftsäule im Inneren der Oboe übertragen, wodurch diese in Longitudinalschwingungen versetzt wird und ein obertonreicher und durchdringender Klang entsteht. Der Name der Oboe kommt vom französischen Wort Hautbois („hohes Holz“) und weist auf die Stimmlage der Oboe hin,

den Sopran. Auf weitere Einzelheiten zum Oboenklang wird in Kapitel 2.3 *Weiterführende Untersuchungen an der Oboe* eingegangen.

Violine: Bei der Violine entsteht der Klang durch eine schwingende Saite. Indem der Bogen über die Saite gestrichen wird, zieht er sie mit sich. Dadurch wird die Rückstellkraft betragsmäßig so groß, dass die Saite sich löst und zurückschnellt. Wenn Auslenkung und Betrag der Rückstellkraft kleiner geworden sind, kann der Bogen die Saite wieder mit sich ziehen. Der Vorgang beginnt von neuem. Zur Reibungsverstärkung wird der Bogen mit Kolophonium bestrichen. Die Saitenschwingung allein reicht zur Schallabstrahlung nicht: Die Schwingung überträgt sich über den Steg auf den Resonanzkörper, der sie dann weiter an die Luft überträgt. „Bei Saitenschwingungen kann die Saite als Ganzes und in mehreren Teilen schwingen, [...] wir erkennen außer der Saite als Ganzes (●) noch die Teilung in zwei (●), drei (●), vier (●) usw. Teile.“¹³

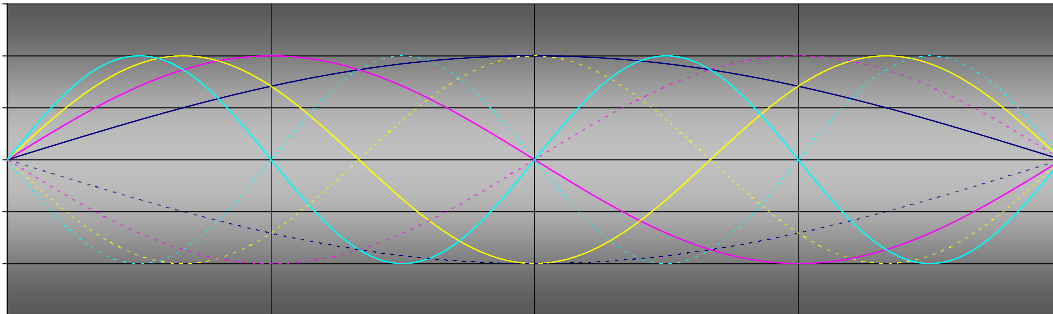


Abbildung 17: Schwingende Saite

„Bei Saitenschwingungen können nun die Schwingungen der ganzen Saite und ihrer Teile gleichzeitig erfolgen. Die entstehenden Frequenzen betragen das zwei-, drei-, vier- usw. -fache der ganzen Saite.“¹⁴ Das erklärt, dass die Obertöne auch bei der Violine genau ganzzahlige vielfache Frequenzen der Grundschwingung besitzen. Der Ton einer Saite wird höher, je kürzer die Saite, je kleiner der Querschnitt und ihre Masse ist und je straffer sie gespannt ist. Bei den Frequenzspektren der Violine stellt man darüber hinaus fest, dass einige Obertöne nur sehr schwach ausgeprägt sind oder sogar völlig fehlen. Die Erklärung dafür ist, dass an der Streichstelle immer ein Schwingungsbauch entsteht, also diejenigen Oberschwingungen wegfallen, die an dieser Stelle einen Knoten hätten. „Man kann deshalb durch die Wahl der Anstreichstelle die Klangfarbe ändern. Eine weitere Änderung erfolgt auch durch Wechsel des Bogendrucks, der Streich-

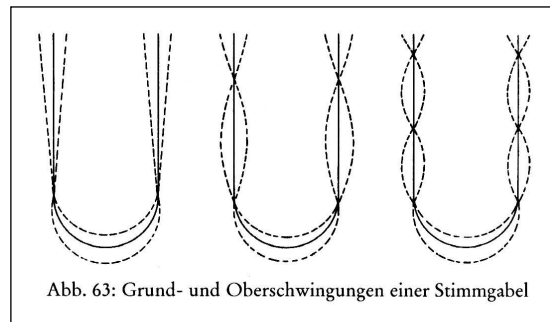
¹³ Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 26

¹⁴ Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 26

geschwindigkeit, des Winkels zwischen Saite und Bogen sowie durch die Größe der Klebekraft.“¹⁵

Flügelhorn: Beim Flügelhorn als Blechblasinstrument werden die Schwingungen von den menschlichen Lippen verursacht, unterstützt durch ein trichter- oder kesselförmiges Mundstück. Die Schallröhre lässt – durch Längenänderung über Ventile – bestimmte Grund- und Oberschwingungen zu, von denen jeweils die erklingt, die der Frequenz der Lippenschwingung am nächsten ist. Die Röhrenschwingung wirkt dabei auf die Lippen zurück. „Die Bläserlippen und die Schallröhre wirken als gekoppeltes System zweier schwingungsfähiger Gebilde. Da die Lippen das stärker, die Schallröhre das schwächer gedämpfte System darstellen, wird die Kopplungsfrequenz weitgehend durch die Eigenresonanzen der Schallröhre bestimmt. Die Lippen erzeugen keine sinusförmigen, sondern verzerrte Schwingungen. Dadurch werden auch die zahlreichen Harmonischen der Schallröhre angeregt“¹⁶ Das Flügelhorn mit seiner etwas größeren Mensur (das ist das Verhältnis von Querschnitt zu Länge der schwingenden Luftsäule) als z. B. bei der Trompete fördert vor allem die Ausbildung der tiefen Teiltöne.

Stimmgabel: Das Klangspektrum der Stimmgabel zeigt, dass die Schwingung einen nahezu reinen Sinuston ergibt. „Am Zinkenende befindet sich stets ein Schwingungsbauch, die Krümmung des Jochs ändert sich periodisch und setzt den Gabelstiel in longitudinale Schwingungen (Abb. 63). Wird die Stimmgabel mit einem



harten Gegenstand angeschlagen, so ist der hohe klirrende [Klang], der durch [einige sehr hohe und sehr ausgeprägte Oberschwingungen, die unharmonisch zur Grundschwingung liegen,] hervorgerufen wird, deutlich zu hören. Dieser tritt jedoch nur unmittelbar nach dem Anschlag auf und verklingt schnell. Wird die Stimmgabel [wie in diesem Experiment] mit einem weichen Hammer angeschlagen, so sind die entstehenden höheren unharmonischen Eigentöne im Verhältnis zum Grundton so schwach, dass sie nicht in Erscheinung treten und die Schwingungsform der Stimmgabel nahezu sinusförmig ist.“¹⁷

¹⁵ Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 60

¹⁶ Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 115

¹⁷ Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 146

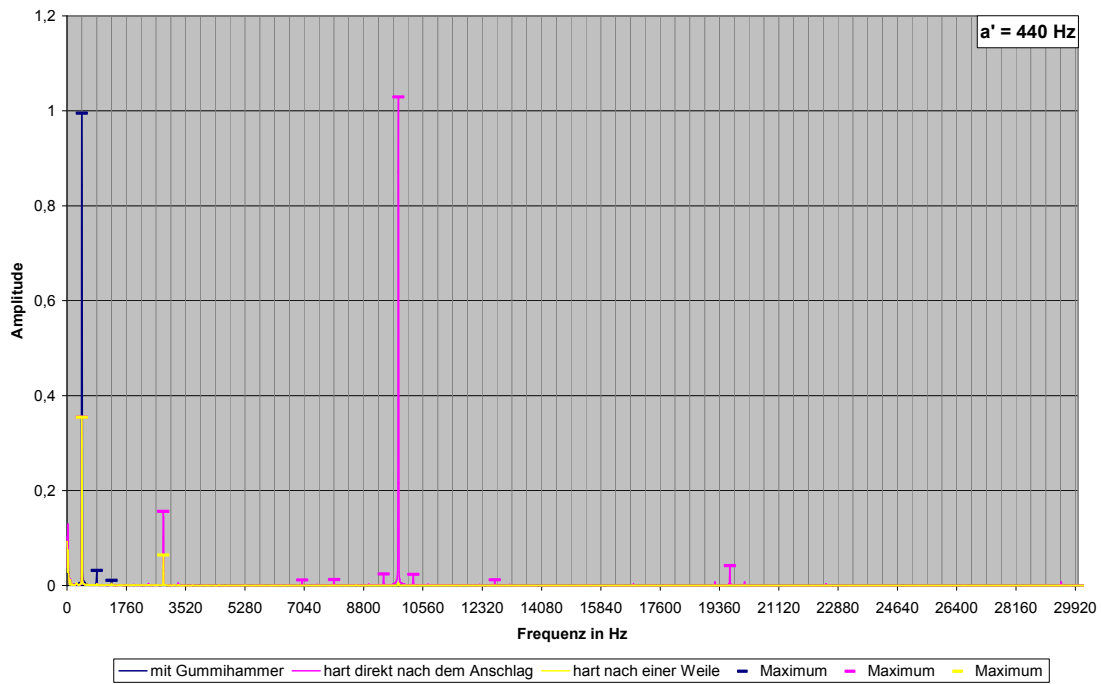


Abbildung 18: Frequenzspektren bei der Stimmgabel

Deutlich zu sehen ist, wie die gelb- und rosafarbig dargestellten Obertöne zwischen den grauen Gitternetzlinien liegen, also tatsächlich keine harmonischen Obertöne sind.

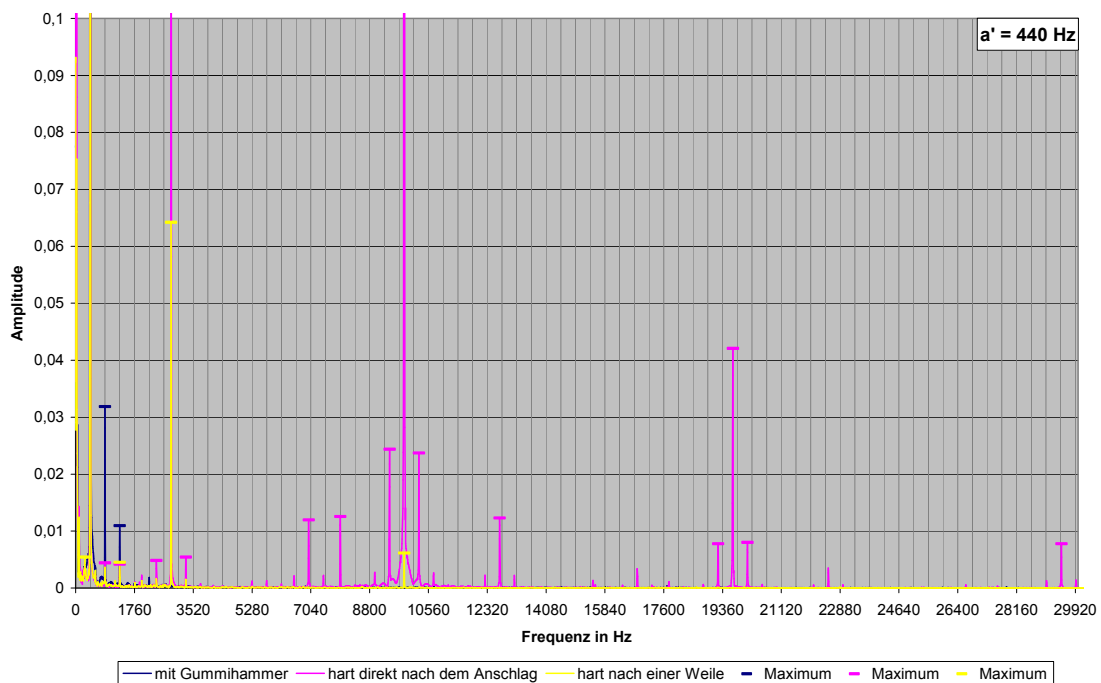


Abbildung 19: Frequenzspektren bei der Stimmgabel im niedrigen Amplitudenbereich

Eine Vergrößerung des niedrigen Amplitudenbereiches zeigt, dass die amplitudenstärksten Oberschwingungen des rosafarbenen Spektrums bei 9834 Hz, bei 19668 Hz und bei 29502 Hz liegen. Selbst bei 39336 Hz (nicht im Diagramm abgebildet) lässt sich noch eine Oberschwingung messen. Die höheren Teiltöne sind also Vielfache der 9834-Hz-Schwingung. Neben diesen Schwingungen sind auch andere Frequenzen und ihre Vielfachen vertreten. Wenn man das rosafarbige mit dem gelbfarbigen Spektrum vergleicht, stellt man fest, dass die hohen Frequenzen der stärksten Dämpfung unterliegen, also am schnellsten abklingen, wohingegen die Grundschwingung fast vollständig erhalten bleibt. (Siehe Abbildung 18: Der rosafarbige Querstrich wird bei 440 Hz vom gelben exakt verdeckt!)

Die sehr unterschiedlich stark ausgeprägten Oberschwingungen lassen sich auch im s - t -Diagramm (Abbildung 20) deutlich erkennen: Die mit dem Gummihammer angeschlagene Stimmgabel schwingt nahezu sinusförmig (●), die hart angeschlagene Stimmgabel ist kurz nach dem Anschlag vor allem durch hohe Frequenzen geprägt (●), zeigt aber insgesamt deutlich die 440-Hz-Grundschwingung, die sie während des Ausklingsens beibehält, wohingegen die Oberschwingungen rasch abnehmen (●).

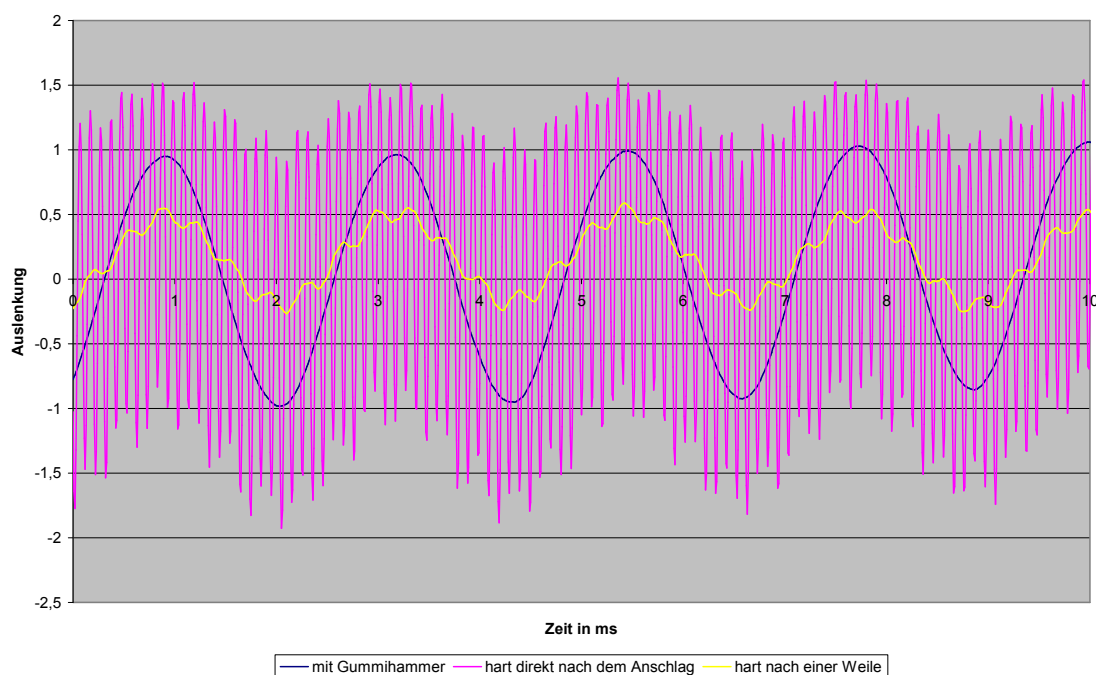


Abbildung 20: s - t -Diagramm der Stimmgabel

2.2.5. Fehlerdiskussion

Beeinträchtigt werden die Messungen durch das Grundrauschen des Mikrofons, Hintergrundgeräusche wie das Brummen vom Kühlschrank im Versuchsraum, das

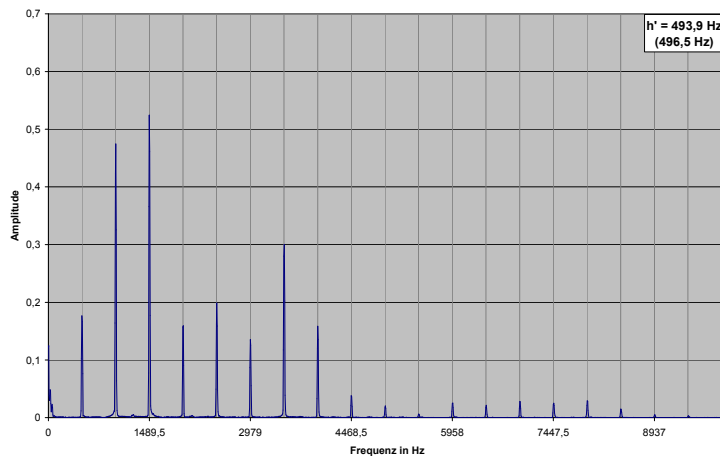
Lüfterrauschen des PCs und die Fahrgeräusche der draußen auf der Straße vorbeifahrenden Autos. Es kam erschwerend hinzu, dass nur eine kurze Messzeit für jeden einzelnen Klang möglich war, dass keine absolute Lautstärkenbestimmung möglich war und die relative Lautstärkenbestimmung auf Schätzungen beruht, da wegen der Lautstärkendifferenzen das Mikrophon auf verschiedene Empfindlichkeiten gestellt werden musste bzw. der Klang aus unterschiedlichen Richtungen aufgezeichnet wurde. Zusätzlich haben Reflektionen an den Raumwänden die Messungen leicht verfälscht. Allerdings tritt dieser Effekt auch in Räumen auf, in denen die Musikinstrumente normalerweise gespielt werden. Der Versuchsraum hatte weder besonders viel noch besonders wenig Nachhall.

2.3. Weiterführende Untersuchungen an der Oboe

2.3.1. Das Überblasen

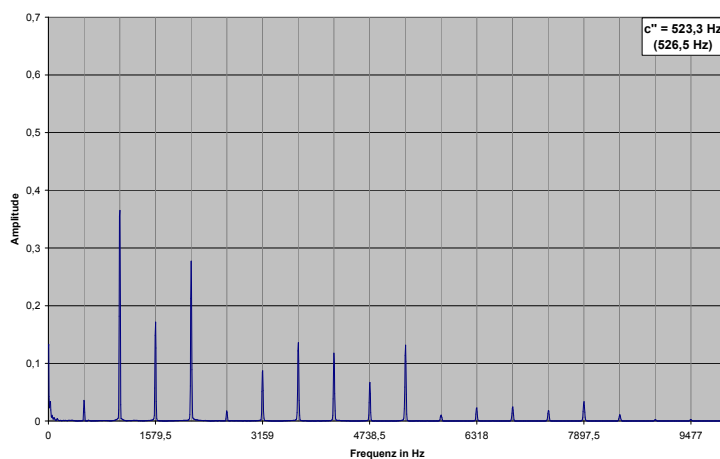
Die Oboe ändert als Holzblasinstrument ihre Tonhöhe, indem die schwingende Luftsäule durch Öffnen von Löchern (durch einen sehr komplizierten Klappenmechanismus) verkürzt wird. Dadurch wird die Wellenlänge geringer, die Frequenz und damit der Ton höher. Auf diese Art werden alle Tonhöhen vom b bis zum c'' erreicht, danach würde eine weitere Verkürzung auf Kosten des Klanges gehen. Für Triller, bei denen man eine verminderte Klangqualität nicht so genau hört, lässt sich die Säule noch weiter über das cis'' bis zum d'' verkürzen, aber normalerweise wird ab dem cis'' die Überblastechnik angewendet: Es wird wieder mit langer Luftsäule gespielt (genauso lang wie für das cis' eine Oktave tiefer), jedoch wird ein ganz kleines Loch geöffnet, das zwar nicht groß genug ist, um die schwingende Luftsäule zu verkürzen, wohl aber die Bildung eines Druckknotens begünstigt, sodass in der Luftsäule, die eigentlich ein cis' hervorbringen sollte, genau doppelt so viele Druckknoten und -bäuche entstehen können, also ein cis'' erklingen kann. Das erleichtert dem Spieler das Erreichen der nächsthöheren Oktave durch veränderte Lippenanspannung. Diesen Oktavwechsel nennt man Überblasen.¹⁸ Beim letzten Ton vorm Überblasen (c'') ändert sich die Klangfarbe durch den sehr schwachen Grundton merklich. Der erste übergeblasene Ton (cis'') besitzt wieder einen starken Grundton.

¹⁸ vgl. Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 96



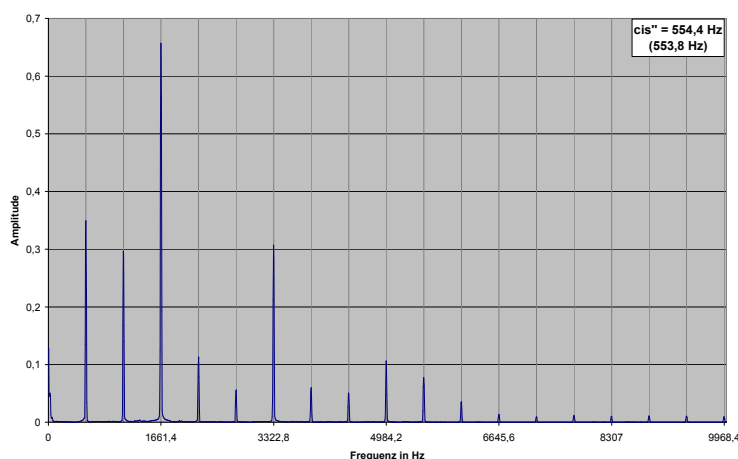
Das Frequenzspektrum des h' zeigt die „normale“ Klangfarbe der Oboe.

Abbildung 21: Frequenzspektrum beim h'



Beim Frequenzspektrum des c'' (höchster Ton vor dem Überblasen) wird deutlich, dass der Grundton sehr schwach ist, fast gar nicht mehr vorhanden.

Abbildung 22: Frequenzspektrum beim c''



Das Frequenzspektrum des cis'' (tiefster überblasener Ton) zeigt, dass der Grundton eine sehr hohe Intensität hat und nach der dritten Harmonischen sogar der zweitstärkste Partialton ist.

Abbildung 23: Frequenzspektrum beim cis''

Trotzdem ist die subjektiv empfundene Klangfarbenänderung an der Überblasgrenze gering, denn der an sich sehr schwache Grundton beim c'' wird vom Ohr als sogenannter Kombinationston deutlich gehört. Ein Kombinationston, der erst im Ohr entsteht und von den Ohreigenschaften abhängt, hat als Frequenz die Frequenzen-Differenz zweier Töne.¹⁹ Zwei benachbarte Harmonische haben als Frequenzabstand genau die Frequenz des Grundtons. Dem Hörer wird also ein starker Grundton vermittelt.²⁰

2.3.2. Bestimmung der Formanten

Aufgrund der Oboengeometrie gibt es Frequenzbereiche, in denen Oberschwingungen durch Resonanz eine Verstärkung erfahren und deshalb größere Amplituden haben als andere Oberschwingungen. Sie treten deutlicher hervor und prägen die Klangfarbe der Oboe. Um diese bevorzugten Frequenzbereiche zu finden, werden alle Frequenzspektren der Oboe über zwei Oktaven addiert. Damit die einzelnen Obertöne nicht zu einer unübersehbaren Vielzahl von zufälligen, nicht aussagefähigen Spitzen führen, wird die Kurve durch Mittelwertbildung ein wenig geglättet. Das Ergebnis zeigt die folgende Abbildung:

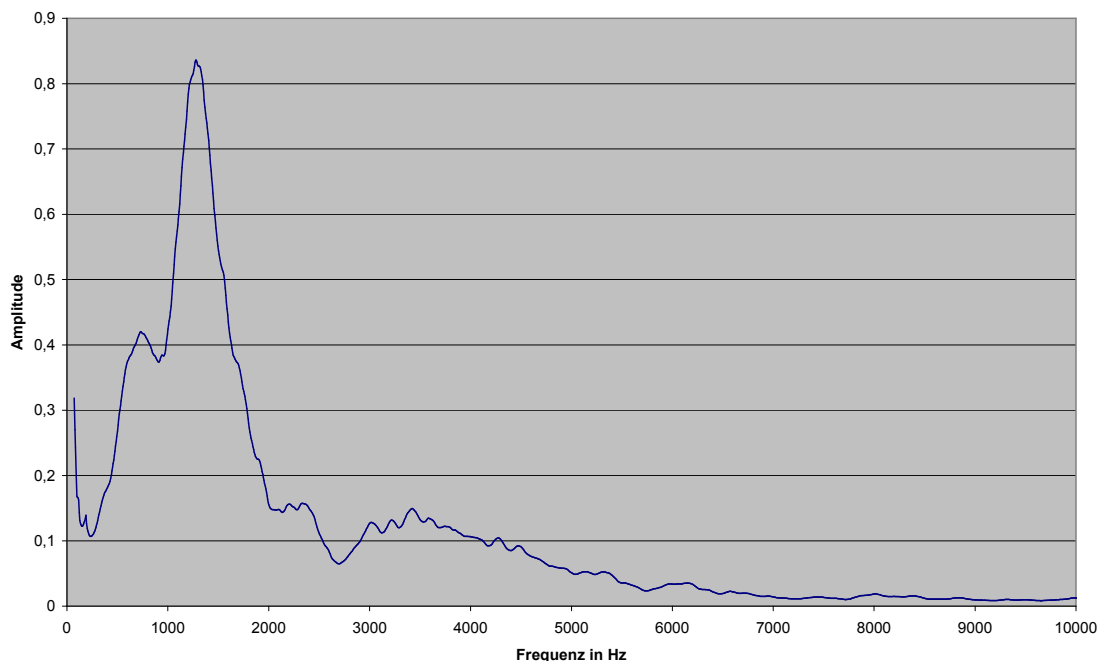


Abbildung 24: Formanten-Bestimmung bei der Oboe durch die Töne vom b bis zum h''

Der Kurvenverlauf zeigt, dass die Obertöne in zwei bestimmten, feststehenden Frequenzbereichen stärker ausgebildet sind als in anderen, und zwar erstens in der

¹⁹ vgl. Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 29-30

²⁰ vgl. Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 99

Umgebung von 1300 Hz und zweitens von 3000 Hz bis 3500 Hz. Die Analyseergebnisse für meine Oboe stimmen gut mit Werten überein, die man in der Literatur findet. Dort werden 1200 Hz und 3000 Hz genannt²¹ bzw. 1400 Hz und 2960 Hz²². Diese besonderen Bereiche werden Formanten genannt. Ihre Lage ist unabhängig von der erzeugten Tonhöhe. „Nur Formanten, die oberhalb der Grundfrequenz eines Tons liegen, haben Auswirkungen auf die Klangfarbe des Tons. Obertöne [...], die in den Bereich einer Formante fallen, werden gegenüber der Grundfrequenz und gegenüber anderen Obertönen verstärkt. [...] Hervorgerufen werden Formanten durch Resonanzen, die zur Verstärkung bzw. Abschwächung bestimmter Frequenzbereiche führen.“²³ Die bei Doppelrohrblattinstrumenten besonders ausgeprägten Formanten rufen die für die Oboe typische, etwas näselnde Klangfarbe hervor.²⁴

2.3.3. *Doppelrohrblatt und Obertonreichtum*

Die gemessenen Schallröhrenlängen zu den einzelnen Tonhöhen stimmen nicht mit den berechneten Längen überein. Das liegt vor allem daran, dass „es sich bei Schwingungserzeuger und Schallröhre um ein gekoppeltes System“²⁵ handelt. Die Rohrblattschwingungen werden durch die Rückwirkung der Luftsäule beeinflusst. „Die resultierende Schwingung entspricht in ihrer Frequenz jedoch nicht einer der Eigenfrequenzen der Schallröhre, sondern es entsteht eine unterschiedliche Kopplungsfrequenz. Diese liegt dem Eigenton des schwächer gedämpften Systems am nächsten. Da das Doppelrohrblatt durch sein Material und die Bläserlippen das stärker gedämpfte System darstellt, wird die Kopplungsschwingung durch das weniger gedämpfte Luftvolumen des Ansatzrohres, also von der wirksamen Länge der [Luftsäule], maßgeblich bestimmt. Dabei ist aber zu beachten, dass infolge der engen Bohrung der Schallröhre die Eigenfrequenzen des angekoppelten Luftraumresonators etwas stärker gedämpft sind als bei den übrigen Blasinstrumenten. Die akustischen Vorgänge bei den Doppelrohrblattinstrumenten sind außerordentlich kompliziert und noch nicht bis ins letzte geklärt.“²⁶ Der Schwingungserzeuger ist sogar noch mit den Lufthohlräumen in Kehle und Brustkorb des Spielers verbunden, es handelt sich also sogar um ein gekoppeltes System mit drei Elementen.

²¹ Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 98

²² <http://www.sengpielaudio.com/FormantenPraegenDieKlangfarbe.pdf>

²³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Formanten> (20.02.2005)

²⁴ vgl. Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 97

²⁵ Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 94

²⁶ Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 94-95

Durch die höhere Dämpfung des Luftraumresonators wird auch im Doppelrohrblatt ein Teil der höheren Harmonischen angeregt. Das verstärkt noch einmal den Obertonreichtum des Oboenklanges. So lassen sich im Klangspektrum des b über 200 (!!!) Obertöne nachweisen.

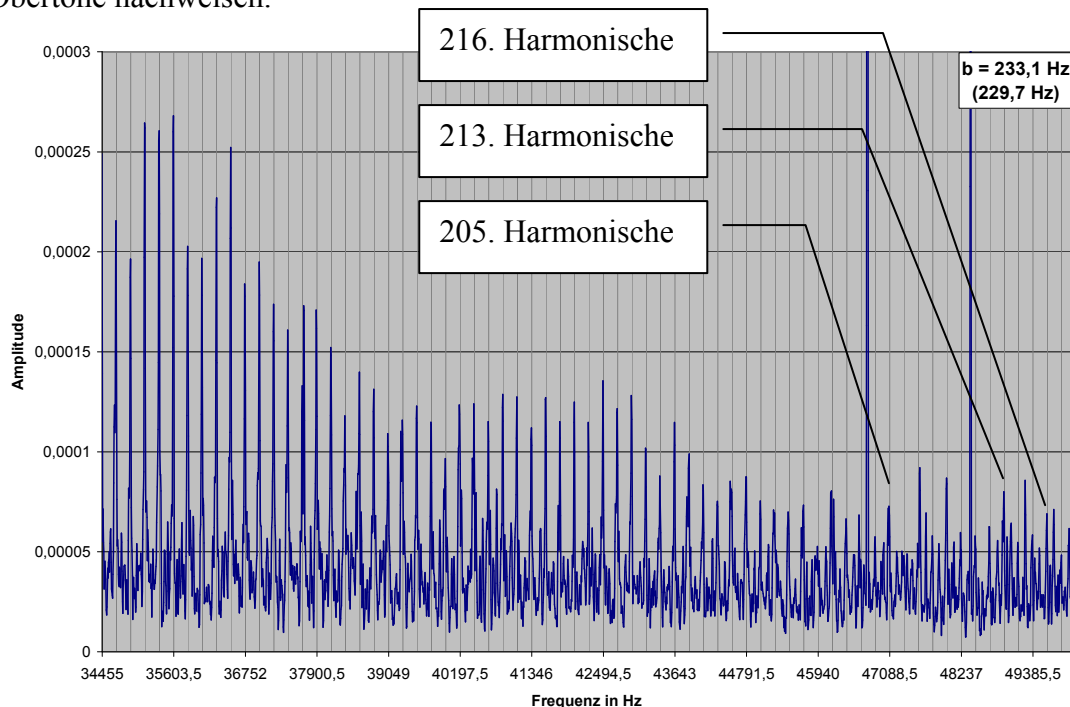


Abbildung 25: Obertöne beim b im Frequenzspektrum der Oboe

2.4. Zweites Experiment: Der Einschwingvorgang

Die Klangfarbenempfindung hängt nicht nur von der spektralen Zusammensetzung des Klanges ab, „sondern auch von den sogenannten Ausgleichsvorgängen. Wenn ein Ton erklingt, so ist er ja nicht sogleich völlig fertig da, sondern er baut sich erst auf, wenn auch recht schnell. Ebenso verschwindet ein Ton nach Abschalten der Energiezufuhr nicht auf einen Schlag, sondern er schwingt aus. Und diese Einschwing- und Ausschwing-(Ausklang-)vorgänge, die man mit Ausgleichsvorgängen bezeichnet,²⁷ sind noch bedeutender für den Klang als das Spektrum des stationären Klanges. Aus messtechnischen Gründen scheidet die Ausschwingphase aus, da entsprechende Kurzzeitmessungen mit den zur Verfügung stehenden Messgeräten nicht ausgelöst werden können. Die Einschwingvorgänge dagegen können per Trigger (Startsignal bei einer bestimmten Elongation) gestartet werden.

²⁷ Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 40

2.4.1. *Aufbau und Durchführung*

Mit demselben Versuchsaufbau wie im ersten Experiment werden diesmal die Klänge der drei Instrumente Oboe, Violine und Flügelhorn beim Einschwingen gemessen.

Die in diesem Experiment 320 ms lange Messung mit 16000 Messwerten (Messintervalle doppelt so lang wie im ersten Experiment: 20 μ s) wird per Trigger gestartet. Die Zeit-Elongations-Tabelle wird nach Microsoft Excel 2002 exportiert und dort mit der sehr umständlichen, weil nicht automatisierbaren Fourieranalyse-Funktion von Excel ausgewertet. Untersucht werden bei jedem Instrument drei Ansätze beim a'. Bei der Oboe werden die Messungen mit einem neuen Mundstück (Rohr) ein zweites Mal durchgeführt, um zu untersuchen, inwiefern sich mit dem neuen Rohr auch der Klang verändert hat.

2.4.2. *Auswertung und Erklärung*

Der zeitliche Aufbau der einzelnen Teiltöne wird in einem Zeit-Amplituden-Diagramm gemeinsam für die ersten fünf Harmonischen graphisch dargestellt. Jede Harmonische hat also ihre eigene Intensitätskurve. Dadurch ist gute Vergleichbarkeit gewährleistet und man erkennt unmittelbar, zu welcher Zeit welcher Teilton dominiert bzw. sich verändert.

Allerdings ist die Erstellung eines solchen Diagramms mit erheblichem Aufwand verbunden. Es wird für aufeinanderfolgende relativ kleine Zeitintervalle (10,24 ms; $2^9 = 512$ Messwerte; Zweier-Potenz bei Excel zwingend erforderlich) eine Fourieranalyse durchgeführt. Eine anschließende Mittelwertbildung der Amplituden über zwei benachbarte Zeitintervalle beseitigt die von der Auswertungssoftware verursachte Welligkeit (4 $\frac{1}{2}$ Schwingungen pro Zeitintervall; vergleiche Abbildung 2!). Im Diagramm wird deshalb die gemittelte Amplitude dem Mittelpunkt des vergrößerten Zeitintervalls zugeordnet, sodass die Messpunkte jeweils bei ganzzahligen Vielfachen von 10,24 ms eingetragen sind. Es stellt sich heraus, dass bei keinem der drei untersuchten Musikinstrumente auch nur zwei Einschwingvorgänge in allen Details übereinstimmen. Für die folgende Analyse wird für jedes Instrument je ein Einschwingvorgang ausgewählt, der die charakteristischen Merkmale des Instruments am besten verdeutlicht. Die Diagramme der anderen Messungen befinden sich zum Vergleich im Kapitel 4.6.2. im Anhang.

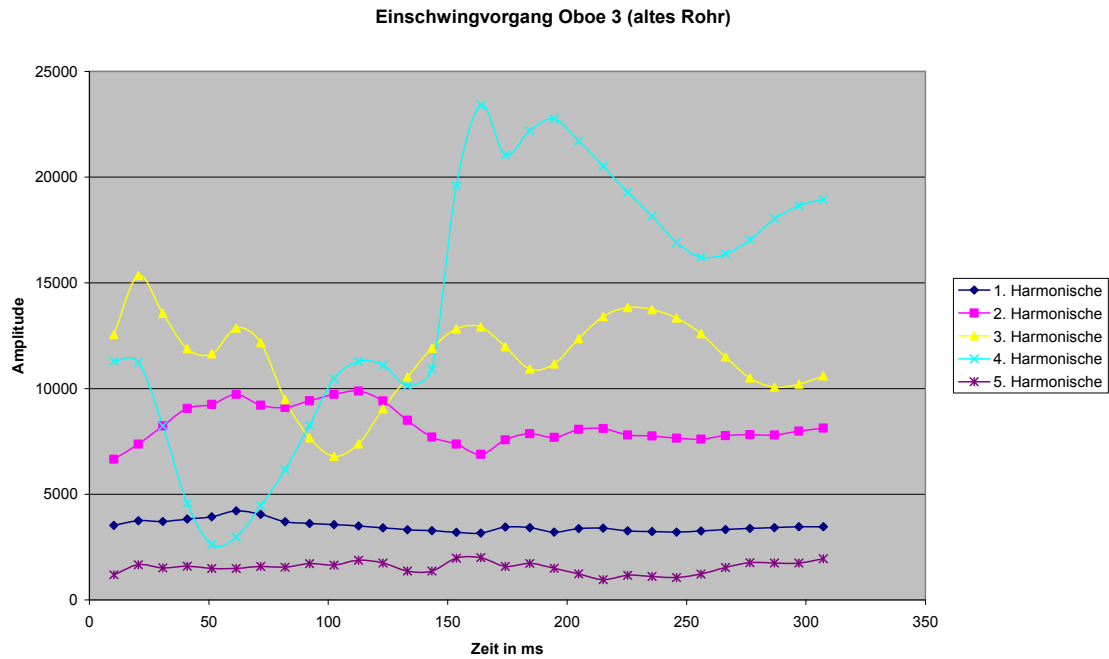


Abbildung 26: Einschwingvorgang Oboe (altes Rohr) – 3. Messung

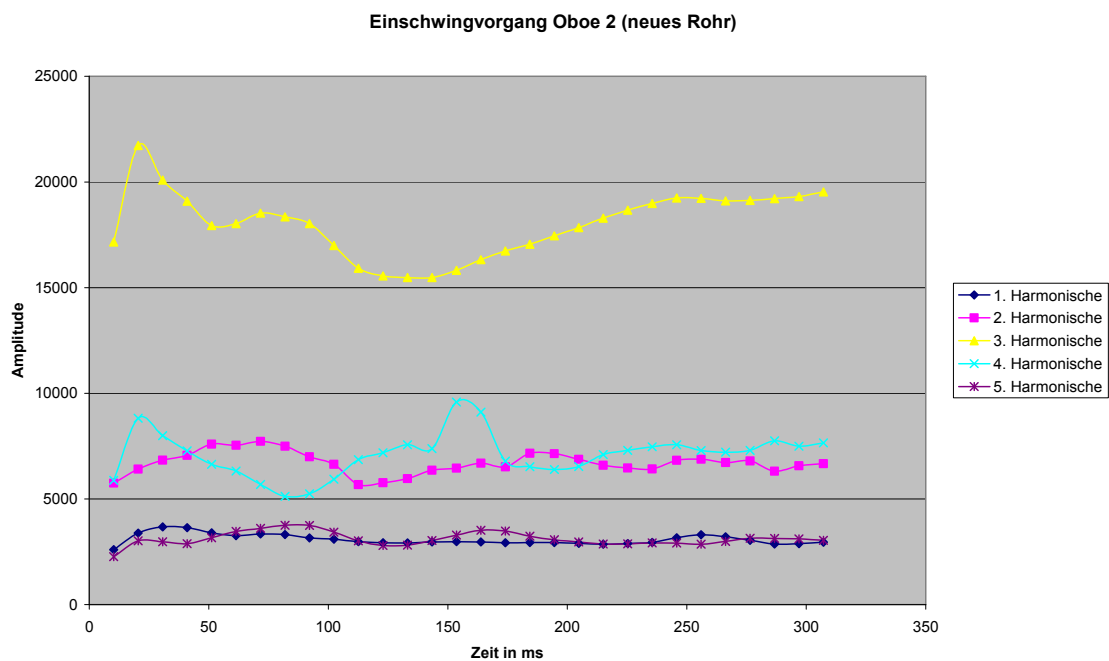


Abbildung 27: Einschwingvorgang Oboe (neues Rohr) – 2. Messung

Typisch für den Einschwingvorgang bei der Oboe erscheint die Konstanz des Grundtones, der fünften Harmonischen und mit Einschränkungen auch der zweiten Harmonischen, die alle drei bereits 30 ms nach Messbeginn ihre endgültige Amplitude erreicht haben. Die meiste Bewegung ist in der dritten und vierten Harmonischen

auszumachen. Diese beiden stärksten Teiltöne des Oboenklanges schwellen zu Beginn stark an (während der Spieler kurzzeitig sehr hohen Luftdruck ausübt, um die Schwingung aufzubauen), um dann über einen relativ langen Zeitraum ein wenig abzufallen (während sich der Klang bei normalem Druck aufbaut), ehe sie ihre endgültige Amplitude erreichen (wenn sich der stationäre Klang eingestellt hat). Interessant ist beim neuen Rohr die Intensitätserhöhung der vierten Harmonischen bei etwa 160 ms, die bei allen drei Messungen mit dem neuen Rohr genau dort aufgetreten ist. Dieselbe Erhöhung ist beim alten Rohr sogar noch stärker ausgeprägt und führt sozusagen zum Durchbruch der vierten Harmonischen als stärkstem Partialton, wohingegen sich beim neuen Rohr die dritte Harmonische als stärkste im stationären Klang erweist. Das Klangbild am Ende des Einschwingvorgangs wird gut bestätigt durch die Frequenzspektren in Abbildung 13 für das alte Rohr und in Abbildung 9 für das neue Rohr.

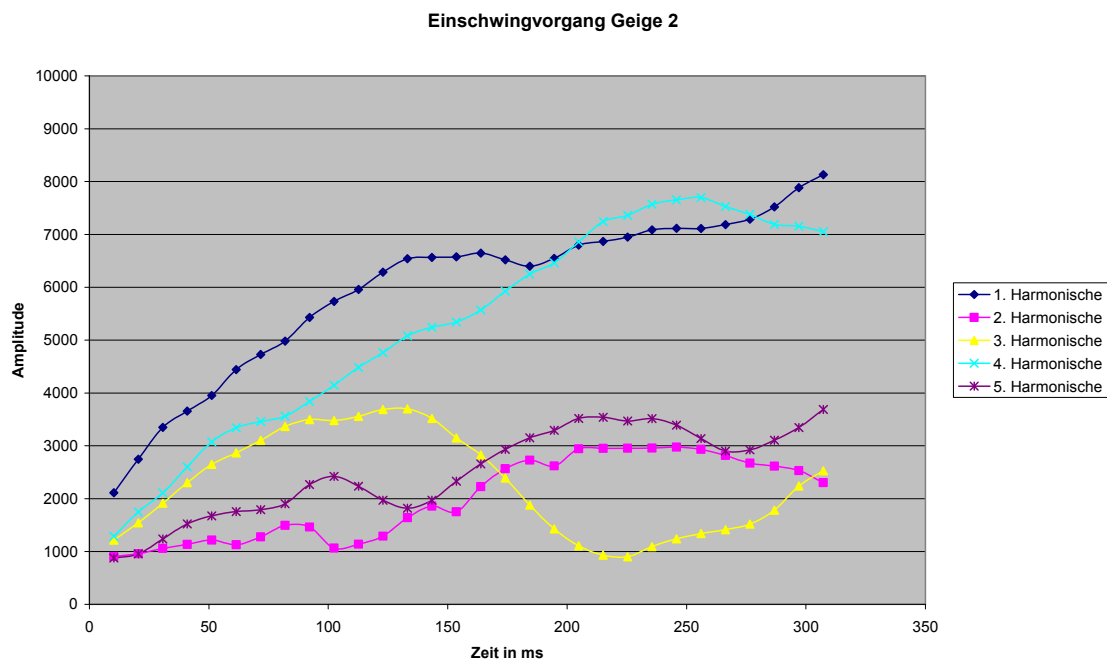


Abbildung 28: Einschwingvorgang Geige – 2. Messung

Der Einschwingvorgang der Violine ist durch einen recht gleichmäßigen Intensitätsanstieg aller Teiltöne gekennzeichnet, wobei die dritte Harmonische (Messung 1: auch der Grundton) im Bereich von etwa 150 ms bis 200 ms (Messung 1: 100 ms bis 150 ms; Messung 3: ab 250 ms) zwischendurch stark abfällt, aber wieder ansteigt. Dieser insgesamt gleichmäßige Anstieg könnte auf die Bogenbewegung zurückzuführen sein: Der Bogen mit seiner Trägheit wird am Tonanfang vom Spieler erst noch beschleunigt

oder stärker angedrückt. Die der Saite zugeführte Energie und damit die Lautstärke steigt anfangs beständig an.

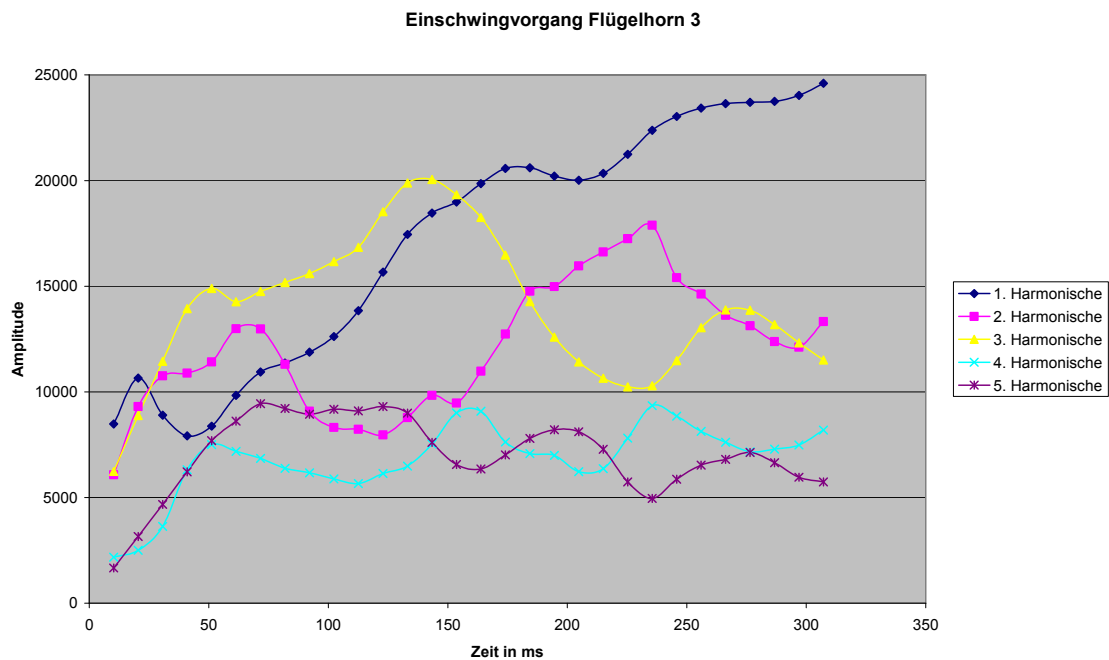


Abbildung 29: Einschwingvorgang Flügelhorn – 3. Messung

Der Einschwingvorgang beim Flügelhorn weist die meiste Bewegung auf. Die drei Messungen zeigen deutlich verschiedene Resultate, sodass es nicht zweckmäßig ist, auf genaue Einzelheiten einzugehen. Alle drei Messungen zeigen aber deutlich, dass sich der Grundton erst relativ spät als stärkste Harmonische durchsetzt. „Erscheinen zuerst die höheren Teiltöne, so wirkt der Klangeinsatz schärfer.“²⁸ Dieser Charakter zeigt sich besonders nach etwa 50 ms.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Einschwingvorgänge bei den drei Musikinstrumenten vielfältigere Unterscheidungsmöglichkeiten bieten und sich deutlicher voneinander unterscheiden als beim stationären Klang. Die Einschwingvorgänge machen den größten Klangunterschied zwischen den unterschiedlichen Instrumenten aus.

2.4.3. Fehlerdiskussion

Neben denselben Fehlerquellen wie bei den Untersuchungen zum stationären Klang ergeben sich Probleme beim Start der Messung. Die Software CASSY-Lab stellt einen Trigger zur Verfügung, jedoch darf dieser nicht zu empfindlich eingestellt werden,

²⁸ Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 43

damit er nicht bei Störsignalen auslöst. Je unempfindlicher er eingestellt wird, desto später beginnt aber auch die Messung. Ein rückwirkender Messungsstart (z. B. mit Hilfe eines Datenpuffers) wäre hier wünschenswert gewesen, ist aber bei CASSY-Lab leider nicht möglich. So gehen am Anfang eines Einschwingvorgangs eventuell wichtige Informationen verloren.

3. Schlussteil

3.1. Zusammenfassung

Anhand der Experimente wird deutlich, wie vielfältig die Musikinstrumente klingen. Welche Klangfarbe man am schönsten findet, muss jeder für sich entscheiden. Objektiv lassen sich auf jeden Fall deutliche Unterschiede feststellen, das gilt im stationären Klang, aber vor allem bei den Einschwingvorgängen. Mit den Messergebnissen lassen sich Sachverhalte erklären wie z. B. das Durchsetzungsvermögen der Oboe, die Lautstärke des Flügelhorns oder die deutlichen Klangunterschiede der Violine zu den Blasinstrumenten.

3.2. Rückblickende Betrachtung

Das Thema bringt es mit sich, dass sehr viele Diagramme dargestellt und ausgewertet werden. Um die Übersicht zu wahren, werden diese Diagramme und einige fachwissenschaftliche Zitate an den entsprechenden Stellen in die Facharbeit eingefügt und nicht in den Anhang geschoben. Die Vorgabe von nicht mehr als 15 Textseiten wird trotzdem eingehalten, die Seitenzahl ist nur durch die platzintensiven Diagramme erhöht.

Die vielen Messungen und vor allem ihre Auswertungen haben zwar sehr viel Zeit in Anspruch genommen, aber trotzdem sehr viel Spaß gemacht. Besonders der hohe Praxisbezug des Themas hat mir gefallen. Ich selbst habe über den Klang meiner Oboe viel Interessantes erfahren.

Weitere interessante Untersuchungen, die leider weit über den Rahmen dieser Facharbeit hinausgehen, wären Messungen zum Ausklingvorgang, die Untersuchungen an anderen Musikinstrumenten oder Experimente zum Einfluss des Spielers auf die Klangfarbe. Gerade die drei Instrumente Oboe, Violine und Flügelhorn bieten dem Spieler vielfältige musikalische Ausdrucksmöglichkeiten.

3.3. Danksagung

Für die Bereitschaft, meine Experimentiertätigkeit zu betreuen, bedanke ich mich bei meinem Fachlehrer Herrn Leutenantsmeyer.

Ich danke meiner Schwester Claudia Weich und Herrn Hamel dafür, dass sie es mir bei mehreren zeitintensiven Versuchsreihen ermöglicht haben, den Klang ihrer Musikinstrumente aufzuzeichnen.

4. Anhang

4.1. Schallwellen

„Ton“ ist genau genommen ein abstrakter Begriff für eine Hörempfindung, die jeder Mensch subjektiv über sein Hörorgan wahrnimmt. Schall ist lediglich die Ursache für einen solchen Ton. Musik, die ja aus Tönen besteht, wird also durch Schall zu uns getragen. Es ist deshalb wichtig zu verstehen, was Schall eigentlich ist. Encarta bezeichnet Schall als „Schwingungen oder Wellen, die bei Mensch oder Tier über den Gehörsinn Geräuschempfindungen auslösen können. Das menschliche Ohr ist in der Lage, Schall mit Frequenzen zwischen ungefähr 15 Hertz und 20 000 Hertz wahrzunehmen. Die [...] Schallwellen sind geringfügige, periodische Luftdruckschwankungen bzw. Schwingungen, die sich in der Luft (oder einem anderen Gas) ausbreiten. Man spricht heute auch dann von Schall, wenn sich Druckschwankungen in Flüssigkeiten oder Festkörpern ausbreiten. Schall mit Frequenzen oberhalb 20 000 Hertz nennt man Ultraschall.“²⁹ Die Auslenkung der einzelnen Oszillatoren (Moleküle) erfolgt bei Schallwellen in Ausbreitungsrichtung. Schallwellen sind also Longitudinal- oder Längswellen. „Bei einer fortschreitenden Längswelle schwingen die Teilchen des Trägers mit der Frequenz f längs der Ausbreitungsrichtung hin und zurück.“³⁰

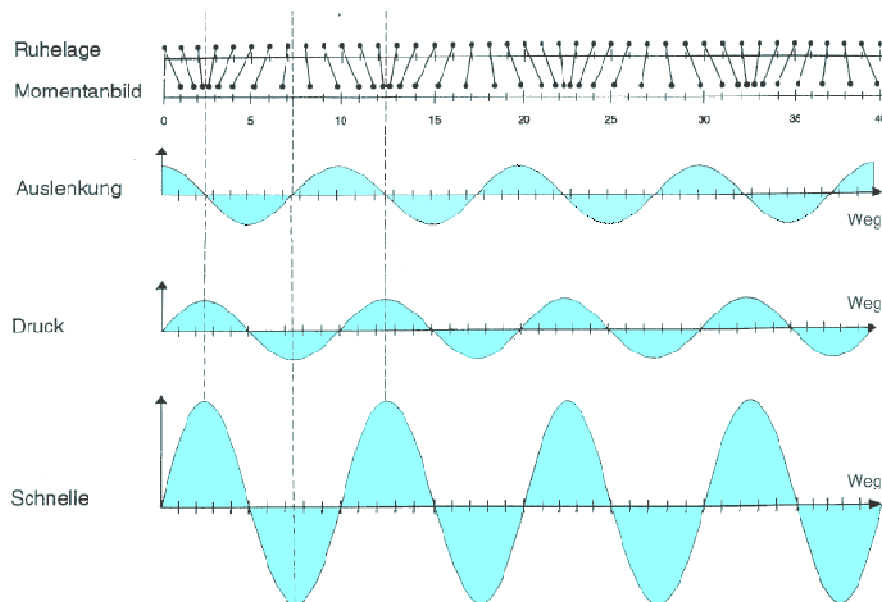


Abbildung 30: Fortschreitende Schallwellen³¹

²⁹ Microsoft® Encarta® Enzyklopädie Professional 2005

³⁰ Dorn Bader: Physik 12/13 S. 130

³¹ http://www.bph.hbt.arch.ethz.ch/Filep/Bilder/kennwerte_schall/Longitudinal.gif (16.01.2005)

Die Abbildung verdeutlicht: Der Druck (genauer: der Druckunterschied), dessen Kraftwirkung auf eine Membran das Ohr bzw. das Mikrofon wahrnimmt, ist um eine viertel Periodenlänge phasenverschoben zur Auslenkung. Die Graphen für Auslenkung und Druck zeigen beide die für Wellendarstellungen übliche Sinuskurvenform. Messtechnisch ist es einfacher, die Auslenkung anhand der Druckdifferenzen zu bestimmen.

Beim Mikrofon bewirkt die schwingende Membran, dass sich in einem Stromkreis der Widerstand ändert und damit auch der Spannungsabfall. Das erklärt auch, warum in CASSY-Lab die Auslenkung s als Spannung U in Volt (V) angegeben wird.

4.2. Ton und Klang

Geräusche oder Knalle spielen bei der Tonanalyse der verwendeten Musikinstrumente keine Rolle. Da die Begriffe Ton und Klang im Bereich der Musik und im Bereich der Akustik teilweise widersprüchlich verwendet werden, spreche ich zur Unterscheidung von einem reinen Sinuston oder von einem Klang (im akustischen Sinne) oder von einem Klanggemisch, um Verwechslungen und Mehrdeutigkeit zu verhindern. Darüber hinaus wird der Begriff „Ton“ zur Bezeichnung für die musikalischen Tonhöhen (c, cis, d, ..., a, b, h) verwendet.

Der Ton-Klang-Begriff	
Akustik	Musik
Sinuston, Ton, reiner Ton, einfacher Ton	Ton
Klang, einfacher Klang, harmonischer Klang	Ton
Klanggemisch, Mehrfachklang, Zusammenklang	Klang

Tabelle 2: Wortwahl in Musik und Akustik ³²

4.3. Oboe, Violine, Flügelhorn und Stimmgabel

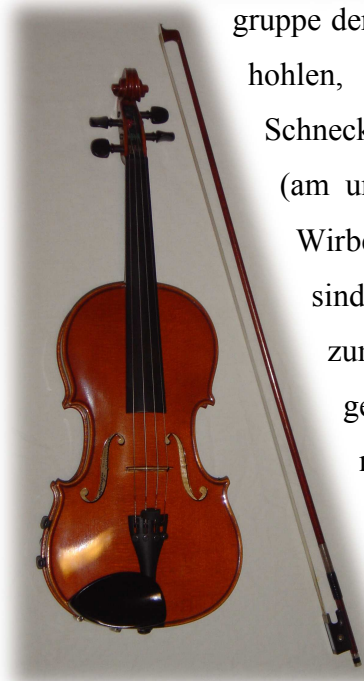
Die Oboe zählt zu den Holzblasinstrumenten, genauer zu den Doppelrohrblattinstrumenten. Sie ist rund 66 cm lang, „bestehend aus einem schnabelförmig zugeschnittenen Doppelrohrblatt als Mundstück, dreiteiliger Hartholzröhre mit enger konischer Bohrung und einem komplizierten Griffloch- und Klappenmechanismus“³³ mit mehr als 20 Klappen.



³² <http://de.wikipedia.org/wiki/Klang> (16.01.2005)

³³ Microsoft® Encarta® Enzyklopädie Professional 2005

Die Violine (auch Geige genannt) gehört bei den Saiteninstrumenten zur Untergruppe der Streichinstrumente (Violinfamilie). Sie besteht aus einem



hohlen, hölzernen Korpus, der durch das Griffbrett mit der Schnecke verbunden wird. „Die Saiten verlaufen vom Saitenhalter (am unteren Ende) über den Steg und das Griffbrett bis zum Wirbelkasten, wo sie an verstellbaren Stimmwirbeln befestigt sind. [...] Der Bogen, mit dem die Saiten angestrichen und zum Klingen gebracht werden, ist eine dünne, konkav gekrümmte Stange aus Pernambukholz von etwa 75 Zentimeter Länge, zwischen deren Enden (Frosch und Spitze) etwa 150 bis 250 Rosshaare gespannt sind.“³⁴

Das Flügelhorn ist ein Vertreter der Blechblasinstrumente. Es zeichnet sich durch drei

Ventile, das kesselartige Mundstück und sein konisches Rohr mit etwas weiterer Bauform als bei der Trompete aus.



Die Stimmgabel ist ein Idiophon (Selbstklinger). Sie besteht aus zwei U-förmig

angeordneten Zinken, wird einmal angeschlagen (z. B. mit einem kleinen Hämmerchen) und schwingt beim Ausklingen mit einer durch Form und Masse bestimmten Frequenz (die zum Experimentieren verwendete Stimmgabel mit 440 Hz) und gibt über einen resonanzfähigen Holzkörper diese Schwingung an die Luft ab.



4.4. Zusammenhang zwischen Frequenz und Tonname

Schon seit dem Altertum wurden Berechnungen über musikalische Skalen angestellt, Versuche am Monochord (Einsaiter) durchgeführt und der Zusammenhang zwischen Saitenlängenverhältnis und Intervall untersucht. Auf diese Weise ergeben sich für zwei

³⁴ Microsoft® Encarta® Enzyklopädie Professional 2005

enharmonisch verwechselbare Töne (z. B. fis und ges) geringfügig verschiedene Frequenzen, die z. B. vom Klavier nicht unterschieden werden können. Um trotzdem in allen Tonarten relativ sauber spielen zu können, kam man zu einer gleichmäßigen Einteilung einer Oktave in zwölf Halbtonschritte. Da das Hörempfinden der logarithmischen Skala entspricht, eine Oktave bei einer Frequenzverdoppelung erreicht wird, bedeutet das, dass der Faktor, mit dem man die Frequenz des nächsthöheren (temperierten) Halbtones berechnet, zwölf Mal mit sich selbst multipliziert zwei ergeben muss, der Faktor ist also $\sqrt[12]{2} \approx 1,05956$. „Für die temperierte Quinte ergibt sich $(\sqrt[12]{2})^7 \approx 1,4983[1]$ und für die temperierte große Terz $(\sqrt[12]{2})^4 \approx 1,25992$.“³⁵ Das entspricht lediglich einer Abweichung zur reinen Quinte von 0,1% bzw. zur reinen großen Terz von 0,8%. Nun ist nur noch eine fest definierte Basis notwendig, damit die Töne absolut festgelegt und Frequenzen zugeordnet werden können. Dafür hat man das als „Kammerton“ bekannte a' gewählt. Dem a' hat man im Laufe der Zeit und in verschiedenen Staaten unterschiedliche Frequenzen zugewiesen, heutzutage sind 440 Hz üblich. Die in den Diagrammen eingetragenen Frequenzen entstammen der gleichmäßigen Temperatur, sie sind also nach folgendem Schema berechnet: $(\sqrt[12]{2})^n * 440\text{Hz}$, wobei n die Anzahl der Halbtonschritte ist, die der Ton über (dann ist n positiv) oder unter (dann ist n negativ) dem Ausgangston a' liegt.³⁶

4.5. Jean Baptiste Joseph Fourier

„Jean Baptiste Joseph Fourier (* 21. März 1768 bei Auxerre; † 16. Mai 1830 in Paris) war ein französischer Mathematiker und Physiker.

Fourier war der Sohn eines Schneiders und wurde in der Kriegsschule zu Auxerre erzogen, wo er sich als Frühentwickler entpuppte. Mit 18 Jahren ernannten ihn die Verantwortlichen der Schule zum Professor. Es folgte eine Anstellung an der berühmten Pariser Polytechnischen Schule. Ende des



³⁵ Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 196

³⁶ vgl. Wilhelm Stauder: Einführung in die Akustik S. 187 bis S. 198

18. Jahrhunderts folgte er Napoléon Bonaparte nach Ägypten, wo er das Sekretariat des Institut d'Égypte übernahm und an der Description de l'Égypte mitarbeitete.

Nach der Rückkehr wurde Fourier 1802 zum Präfekten des Departements Isère ernannt, 1808 zum Baron erhoben. In dieser Funktion sorgte er für die lang überfällige Trockenlegung der Sümpfe bei Lyon. 1815 ernannte ihn Napoleon (nach dessen Rückkehr von Elba) zum Präfekten des Departements Rhône. Seit 1815 lebte er in Paris und war Sekretär auf Lebenszeit der Akademie der Wissenschaften.

Nebenbei beschäftigte er sich auch mit der Physik, und zwar mit der Wärmeausbreitung in Festkörpern. Eine einschlägige Abhandlung wurde von der Pariser Akademie 1807 preisgekrönt. Das wichtigste Werk in diesem Zusammenhang ist die Analytische Theorie der Wärme (1822), wobei er den Begriff l'effet de serre (wörtlich Glashauseffekt, heutzutage als Treibhauseffekt bekannt) schuf. Auch mit der Theorie der Gleichungen beschäftigte er sich.

Mit der Fourieranalyse legte er einen weiteren Grundstein für den Fortschritt der modernen Physik. [Sie hat] auch für die akustischen Grundlagen der Musik eine entscheidende Bedeutung.³⁷

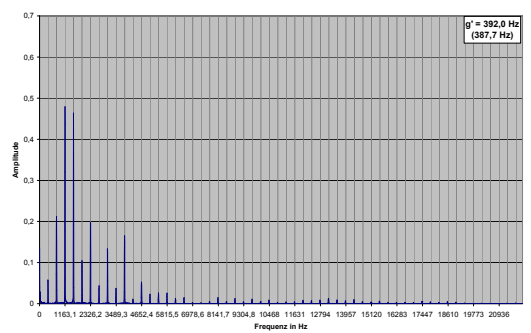
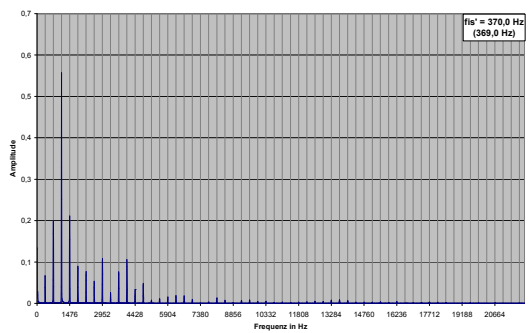
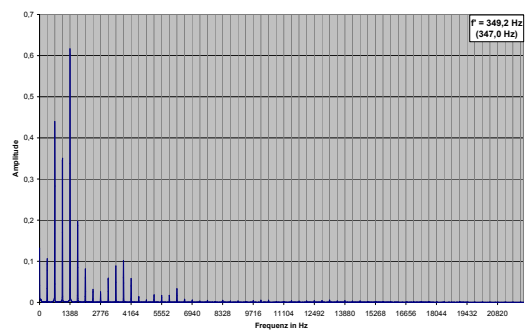
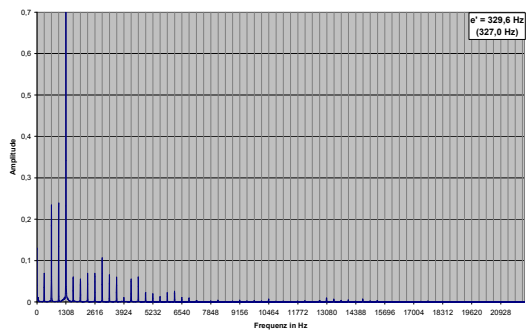
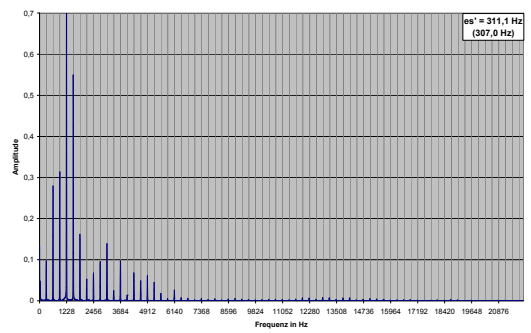
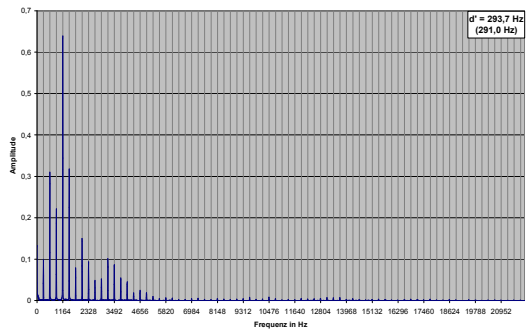
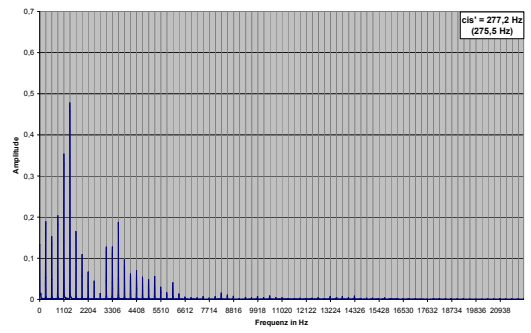
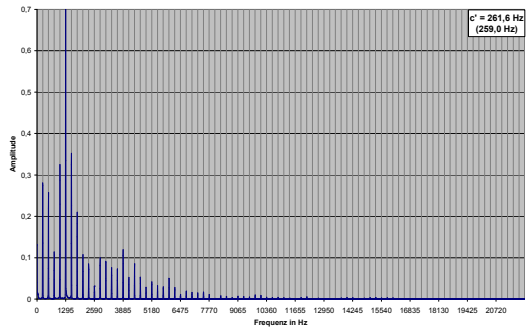
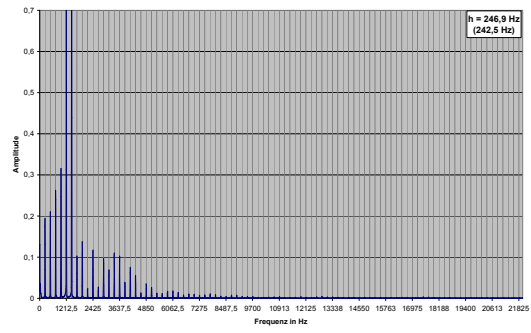
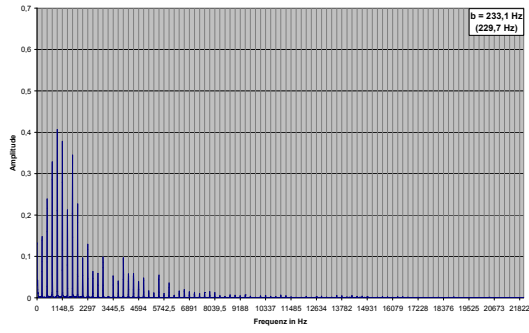
4.6. Diagramme und Abbildungen

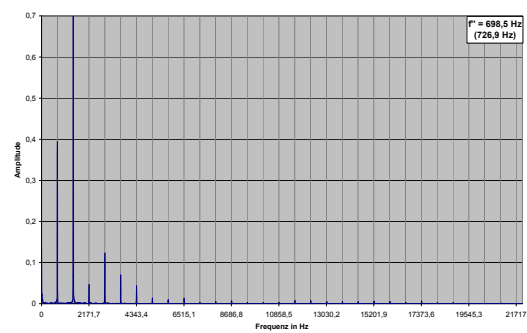
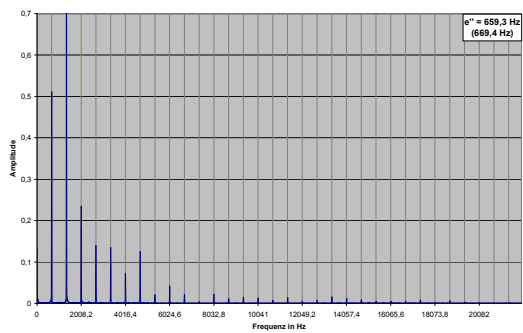
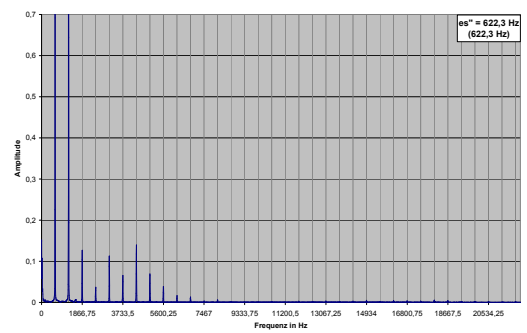
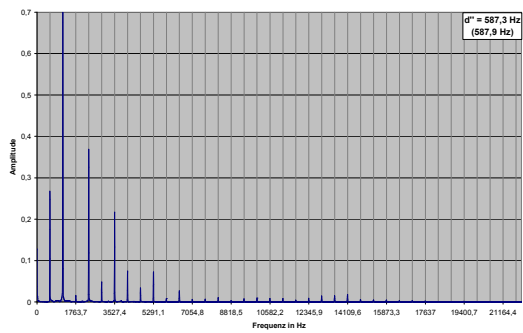
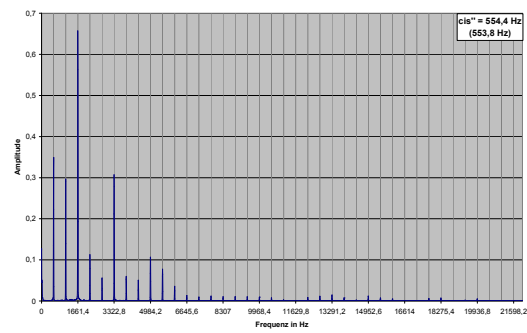
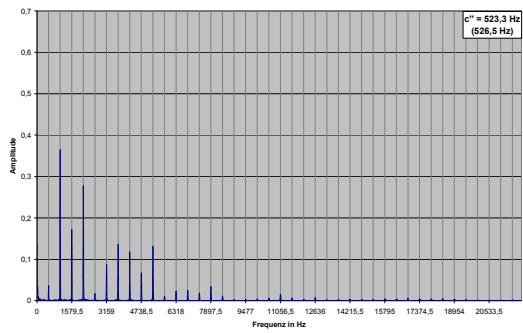
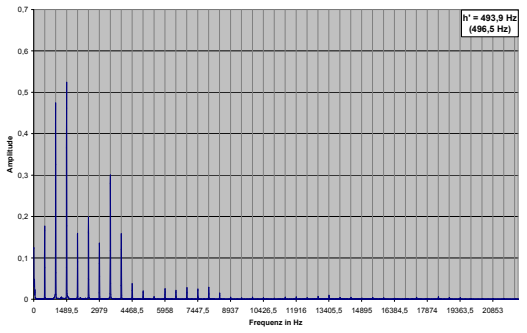
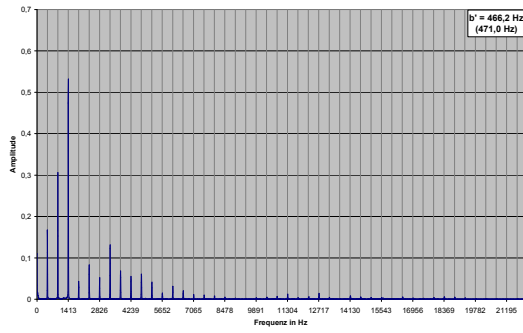
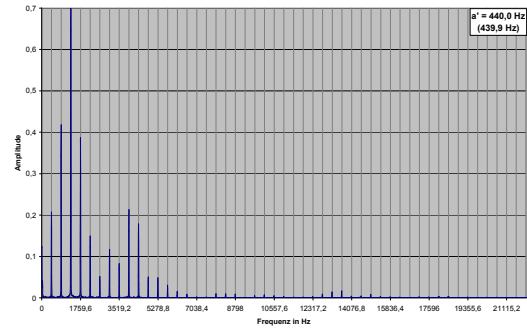
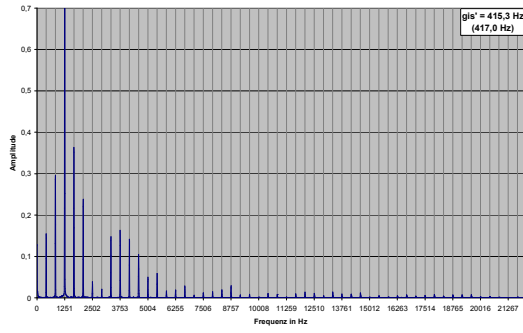
4.6.1. Frequenzspektren der Oboe

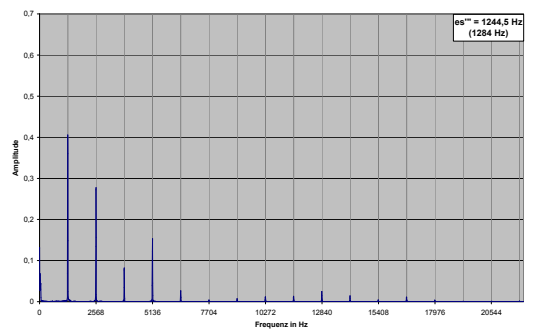
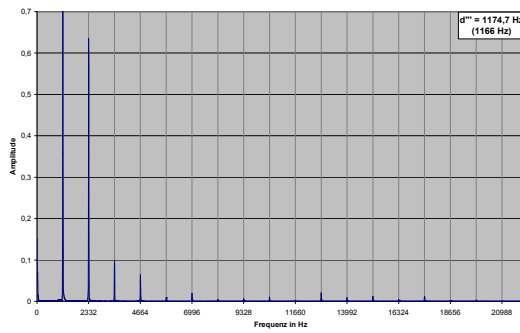
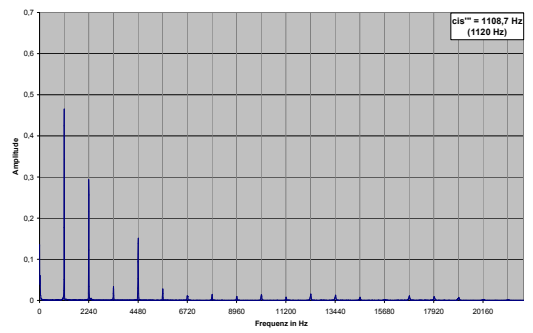
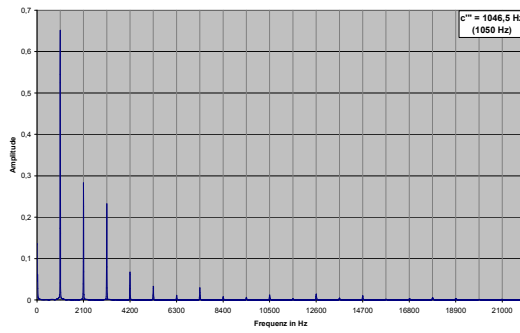
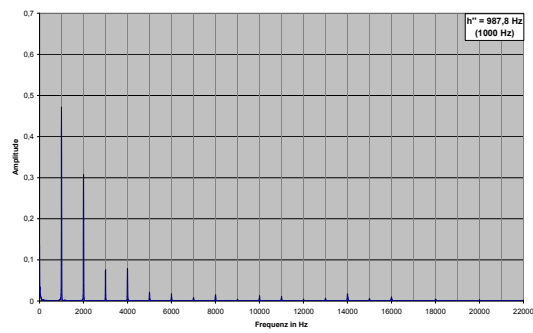
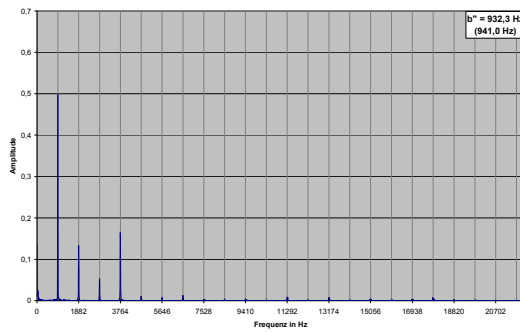
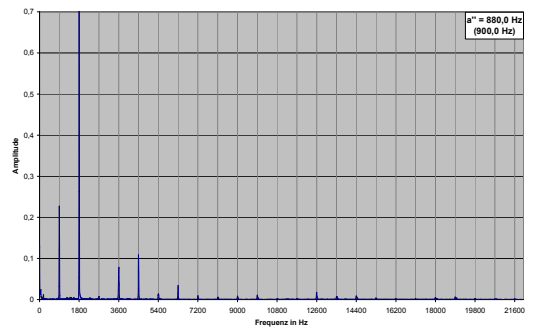
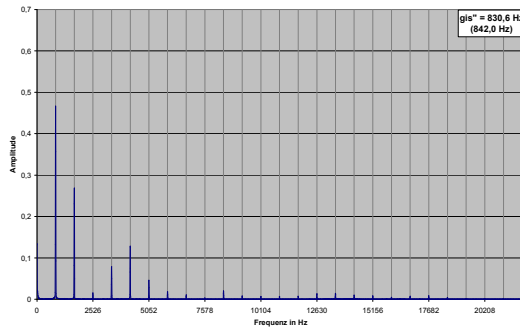
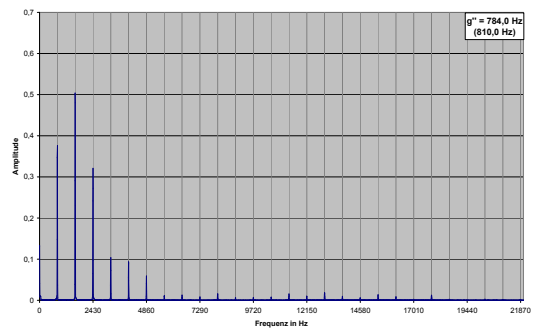
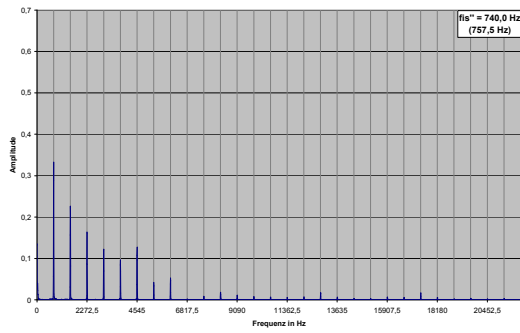
Es folgen die aufgezeichneten Frequenzspektren der Oboe vom b bis zum f'' .

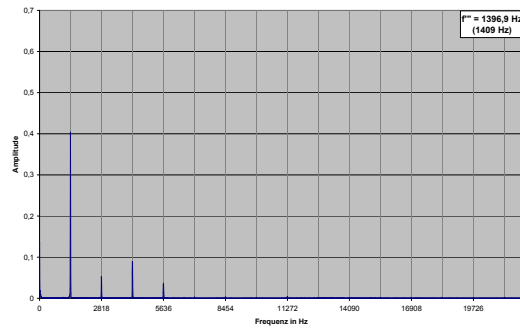
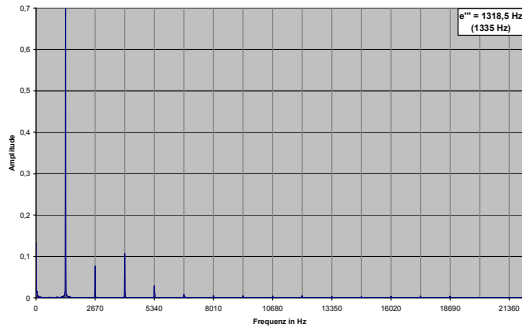
Die mitunter relativ großen Abweichungen von den errechneten Frequenzen haben im Wesentlichen drei Ursachen: Die Temperatur des Instrumentes verändert sich zwischen den Messungen; das Rohr reagiert sensibel auf die ständigen, messbedingten Spielunterbrechungen; die Klänge werden einzeln aufgezeichnet, d.h. man hat keinen Vergleich zu anderen Tonhöhen.

³⁷ http://de.wikipedia.org/wiki/Jean_Baptiste_Joseph_Fourier (25.02.2005)

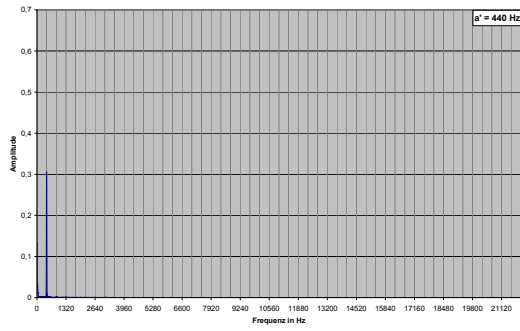
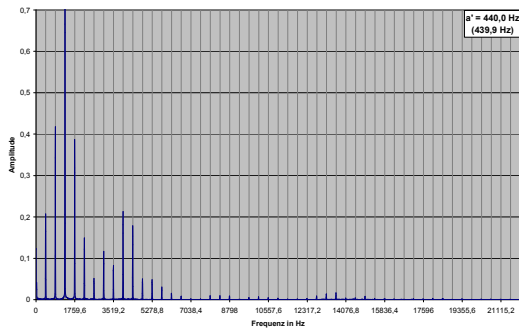








Vergleich der Oboe mit der Stimmgabel für a':



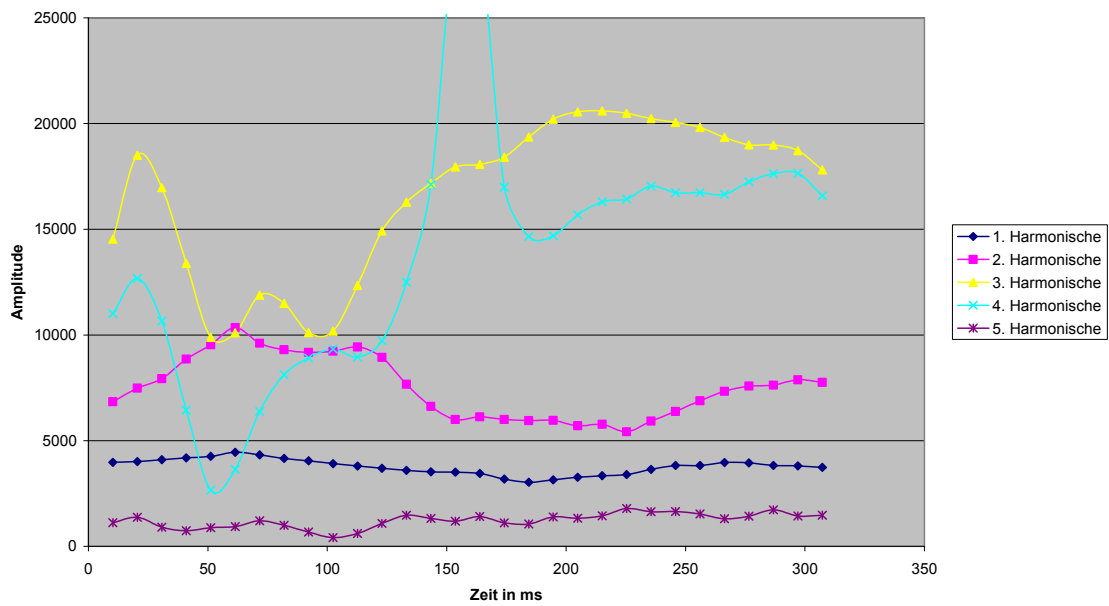
Oboe

Stimmgabel

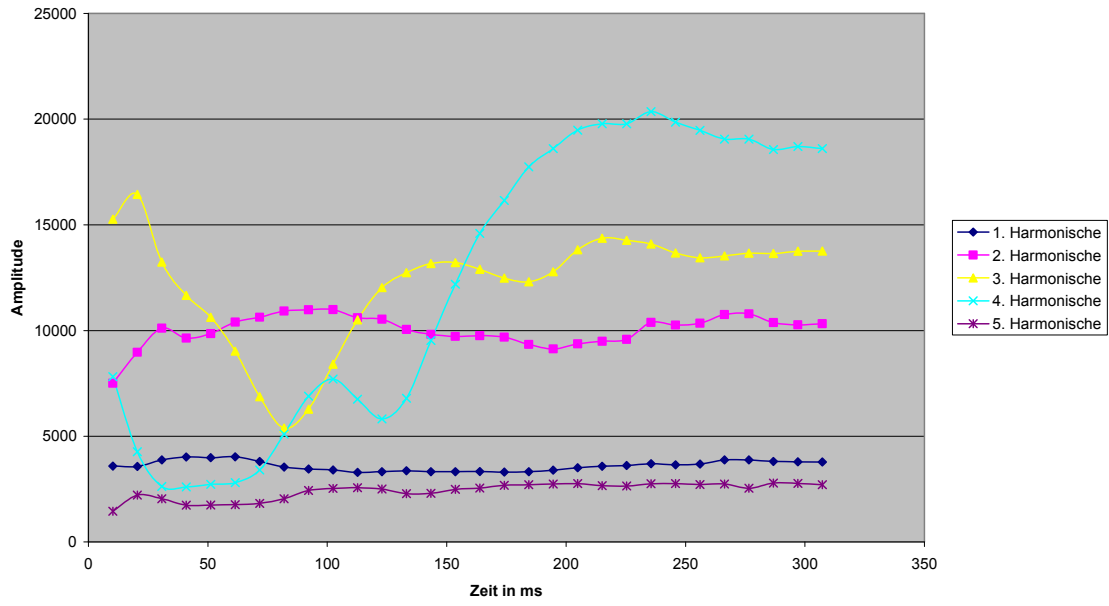
4.6.2. Einschwingvorgänge

Oboe, altes Rohr, drei Messungen:

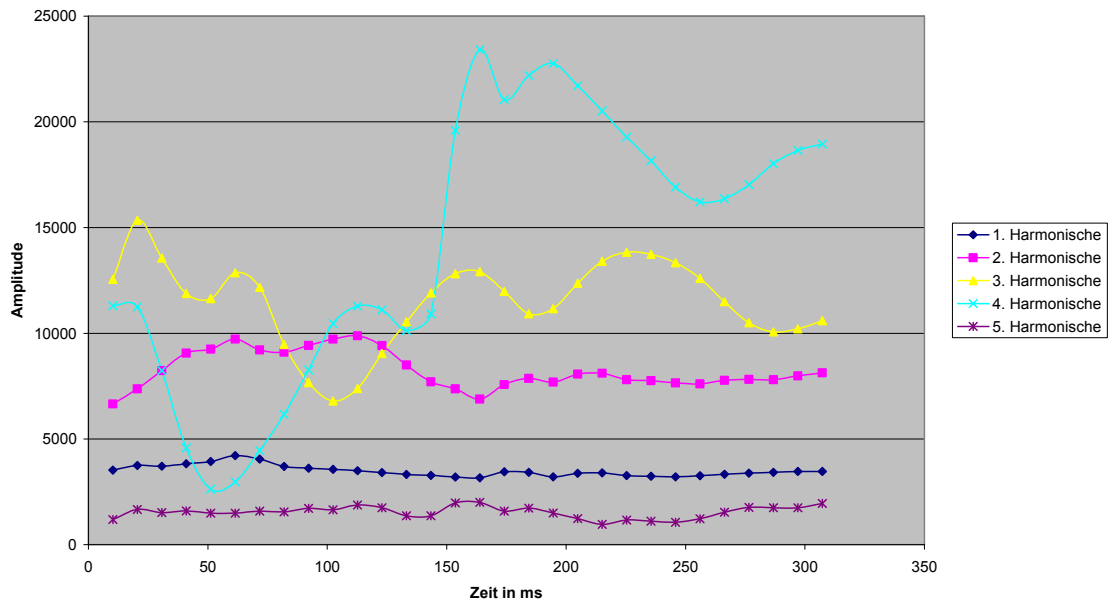
Einschwingvorgang Oboe 1 (altes Rohr)



Einschwingvorgang Oboe 2 (altes Rohr)

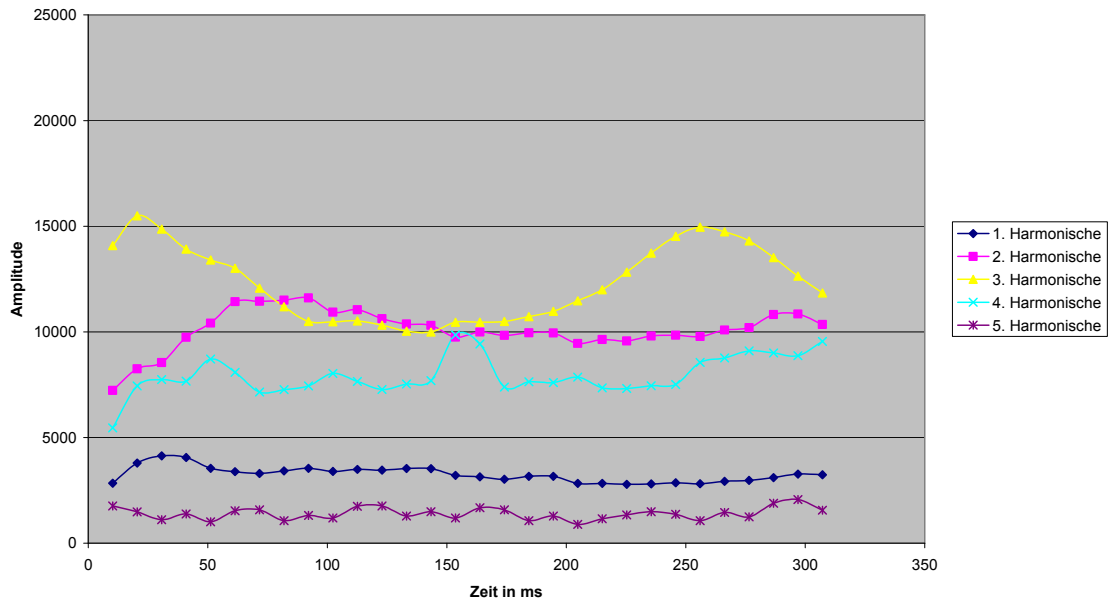


Einschwingvorgang Oboe 3 (altes Rohr)

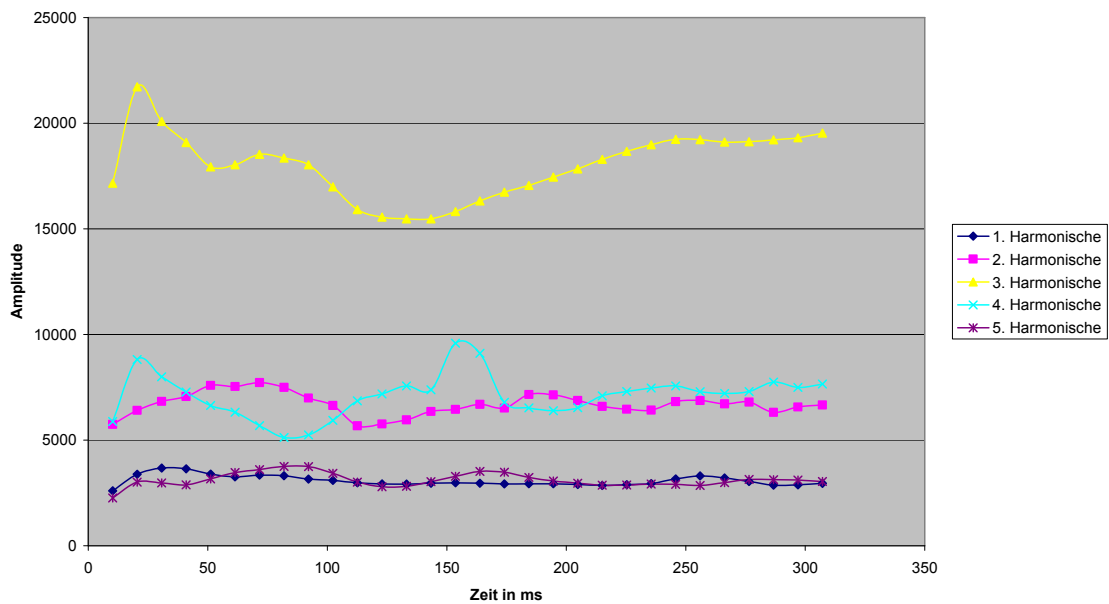


Oboe, neues Rohr, drei Messungen:

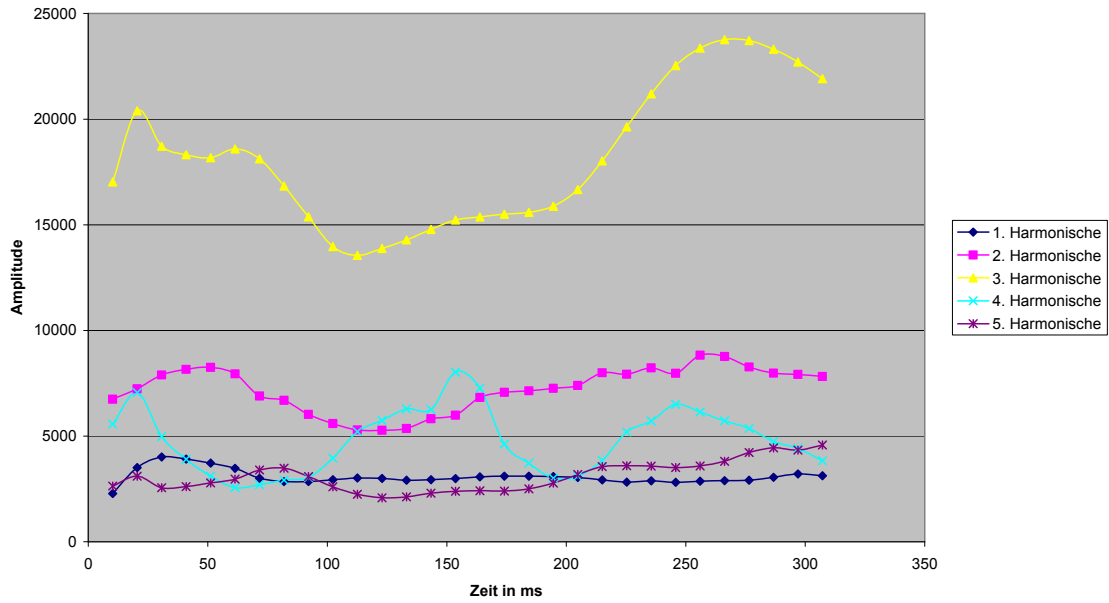
Einschwingvorgang Oboe 1 (neues Rohr)



Einschwingvorgang Oboe 2 (neues Rohr)

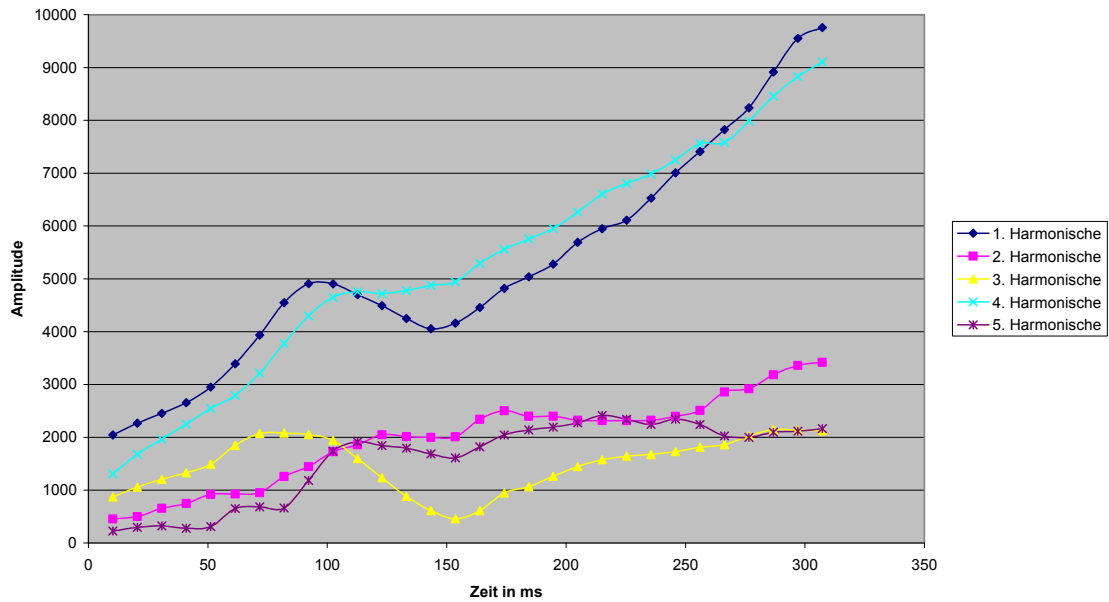


Einschwingvorgang Oboe 3 (neues Rohr)

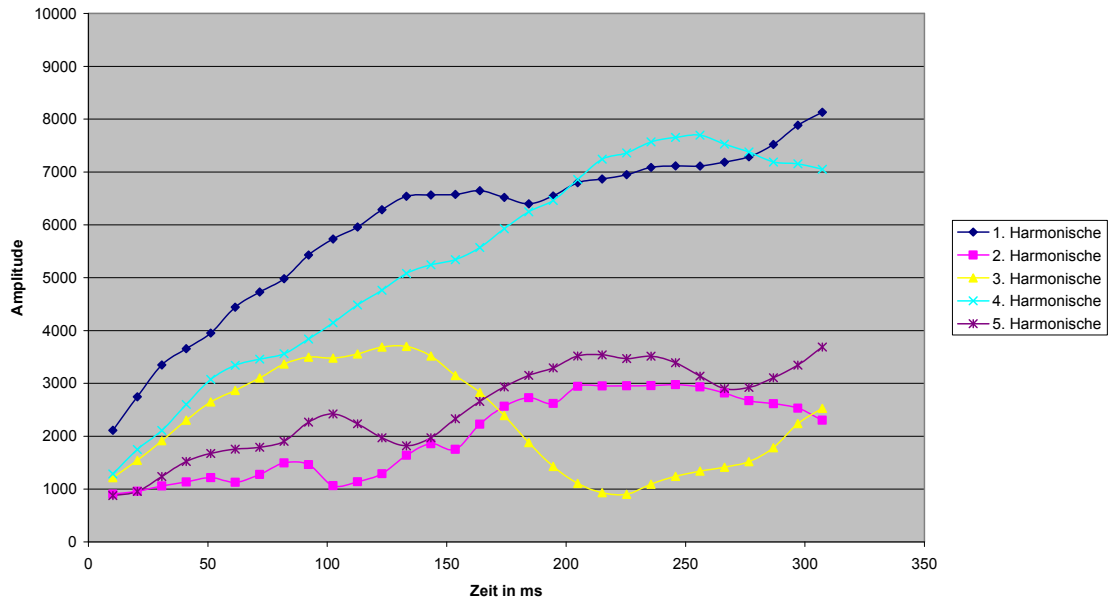


Violine, drei Messungen:

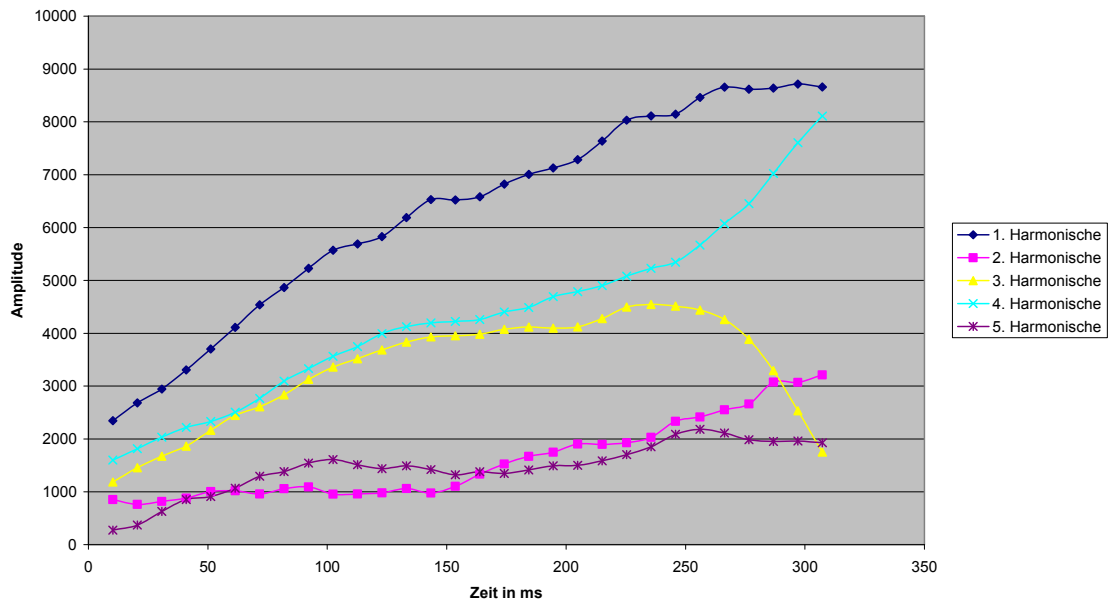
Einschwingvorgang Geige 1



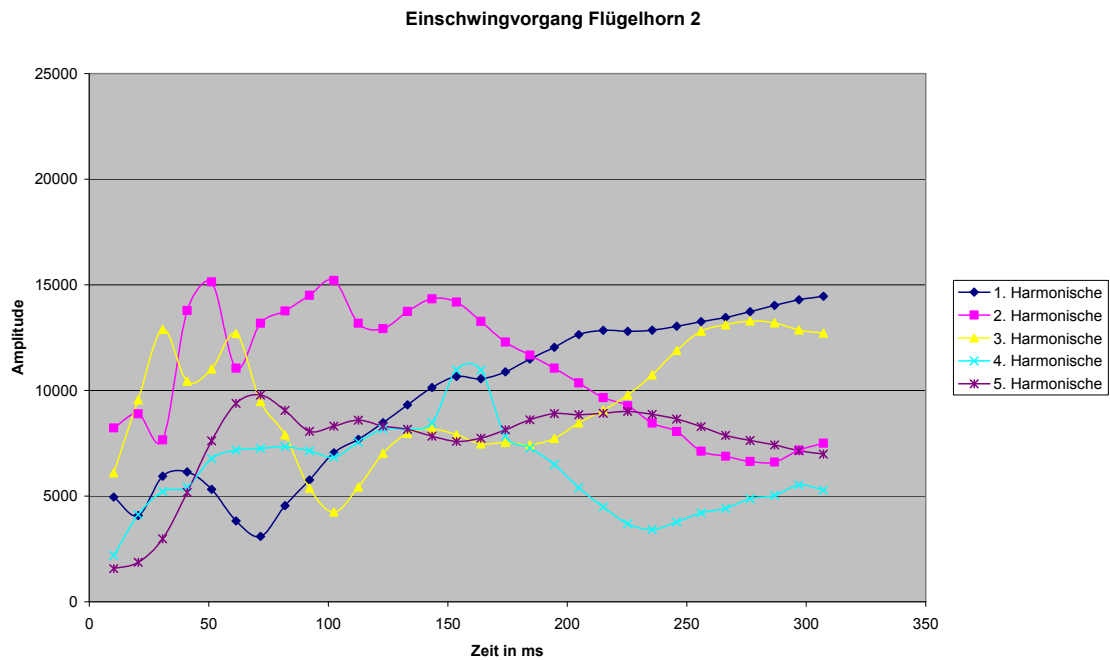
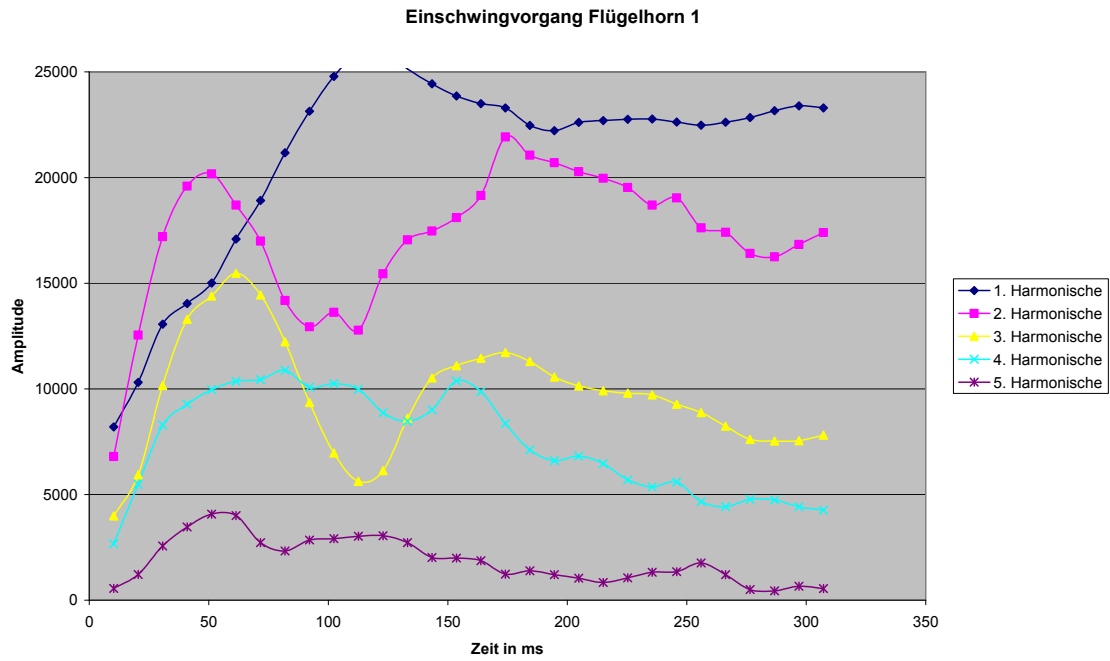
Einschwingvorgang Geige 2

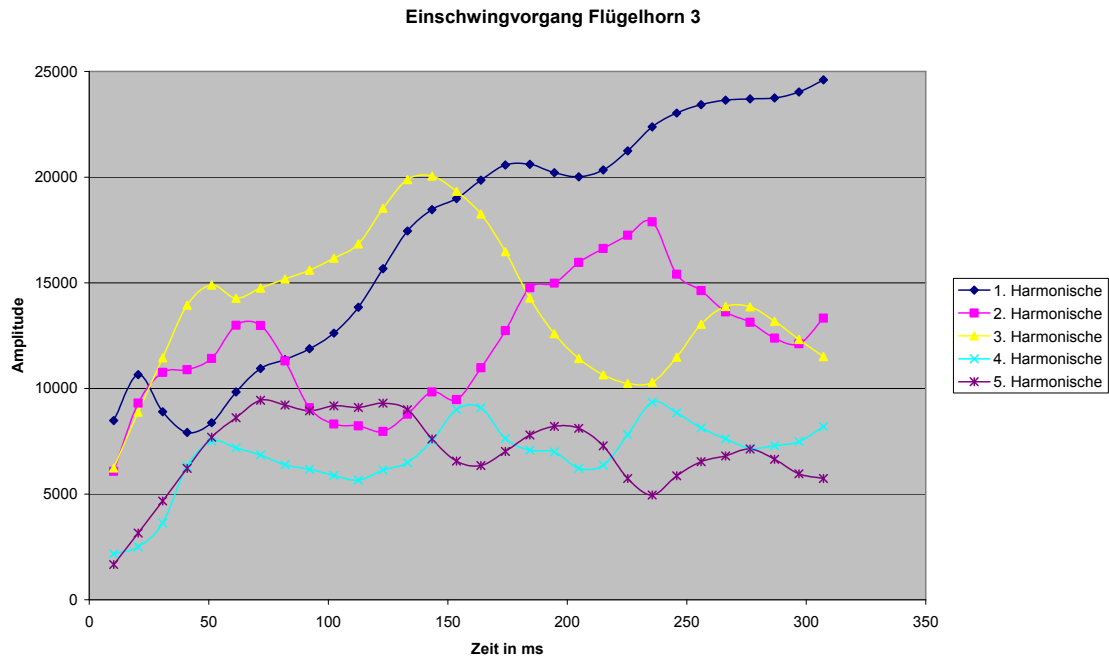


Einschwingvorgang Geige 3



Flügelhorn, drei Messungen:





4.7. Quellen- und Hilfsmittelverzeichnis

Literaturquellen:

- Stowasser, Joseph. M. (1998): Stowasser: lateinisch-deutsches Schulwörterbuch / von J. M. Stowasser, M. Petschenig und F. Skutsch. Auf der Grundlage der Bearb. 1979 von R. Pichl ... neu bearb. Und erw. von: Alexander Christ ... Gesamted: Fritz Lošek. – Ausg. 1994. – Wien: Hölder-Pichler-Tempsky; München: Oldenbourg, 1994 [ISBN: 3-209-01495-7 (Verlag Hölder-Pichler-Tempsky); ISBN: 3-486-134-05-1 (R. Oldenbourg Verlag)]
- Bader, Professor Dr. Franz; u.a. (2000): Dorn-Bader: Physik 12/13 – Gymnasium Sek. II, Schroedel [ISBN: 3-507-10722-8]
- Stauder, Wilhelm (4. Auflage 2004): Einführung in die Akustik, Verlag der Heinrichshofen-Bücher – Wilhelmshafen [ISBN: 3-7959-0121-9]
- Müller-Pouillet (1886): Lehrbuch der Physik und Meteorologie, Neunte umgearbeitete und vermehrte Auflage von Leop. Pfandler, Dr. der Philosophie, Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn

Internetquellen:

- Wikipedia ist eine freie Internet-Enzyklopädie [<http://de.wikipedia.org/>]
- http://www.bph.hbt.arch.ethz.ch/Filep/Schall/Schall_Grundl/Kennwerte/Longitudinal.html
- homepage.ruhr-uni-bochum.de/guenter.luetzig/Imgk/ATI/ATI_02_Fourieranalyse.xls
- http://www.miszalok.de/Lectures/L8_Fourier/Fourier_deutsch.htm

Hilfsmittel:

- Audio Tester V 1.3 – Shareware Version
- Microsoft Excel 2002