

2 Akustik

In der Akustik steht ein reiches Versuchsprogramm zur Verfügung, bei dem wichtige Wellenphänomene studiert werden können.

- Schallwellen in Gasen / Ausbreitungsgeschwindigkeit. Diese Teilversuche eignen sich neben der Messwerterfassung mit dem CASSY-System auch für die Durchführung mit dem Oszilloskop.
 - Laufende Welle – Laufzeit gegen Laufstrecke (2.1.3)
 - Stehende Welle – Schalldruck gegen Frequenz (2.1.4)
 - Stehende Welle – Schalldruck gegen Rohrlänge (2.1.5)
 - Stehende Welle – Schalldruck gegen Ort (2.1.6)
- Schallwellen in Festkörpern / Elastizitätsmodul (2.2)
- Physik der Gitarre
 - Erzeugung und Vermessung einer Schwebung (2.3.4)
 - Bestimmung der Saitenspannung einer Gitarrensaite (2.3.5)
 - Analyse und Variation des Obertonspektrums einer Gitarre (2.3.6)

2.1 Schallgeschwindigkeit in Gasen

2.1.1 Versuchsziel

Wir messen die Schallgeschwindigkeit in Luft aus Laufzeitmessungen (Kap. 2.1.3) und mithilfe von stehenden Wellen: durch Messung der Resonanzfrequenzen (Kap. 2.1.4) bzw. Resonanzlängen (Kap. 2.1.5) in einem Rohr sowie durch Messung des Schalldruckverlaufs (Kap. 2.1.6).

Vorkenntnisse:

Wellen, Schallausbreitung in Gasen, Überlagerung von Wellen, stehende Wellen, Schallwandler (Piezo/Lautsprecher/Mikrofon)

Benötigte Geräte:

Oszilloskop	1x
Sensor CASSY	1x
Timer-Box	1x
Stromquellen-Box	1x
Temperatursensor	1x
Plexiglas Rohr \varnothing 10cm mit Ständer	1x
Endstück mit Lautsprecher	1x
Endstück mit Durchführung	1x
im Rohr verschiebbare Scheibe	1x
Universalmikrofon mit Stativstange u. Sockel	1x
Piezo Hochtöner mit Stativstange u. Sockel	1x
Wegaufnehmer mit Stativstange	1x
Faden 1m mit Gummiring und Gewicht	1x
Tischklemme	1x
Führungsschiene Alu 30x3mm ² L 50cm	1x
Funktionsgenerator 0-200 kHz	1x
BNC -> 4mm Übergangsstecker	2x
BNC -> Lemo Übergangsstecker	2x
4mm Laborkabel 25cm/1.0mm Paar rot/blau	1x
4mm Laborkabel 100cm/1.0mm Paar rot/blau	2x
4mm Laborkabel 200cm/1.0mm Paar schwarz	1x

2.1.2 Grundlagen

2.1.2.1 Schallgeschwindigkeit in Gasen

Die Ausbreitung von Schallwellen in Gasen ist ein adiabatischer Prozess. Das Schallfeld ist durch die Angabe von Schallschnelle $u(x, t)$ (lokale Geschwindigkeit der Gasmoleküle) oder Schalldruck $p(x, t)$ (lokale Abweichung des Drucks vom Außendruck) beschrieben. Ist der Schalldruck p klein gegenüber dem Außendruck p_0 , so gelten die Euler-Gleichungen:

$$\frac{\partial}{\partial x} p(x, t) = -\varrho \frac{\partial}{\partial t} u(x, t) \quad \text{und} \quad \frac{\partial}{\partial x} u(x, t) = -\frac{1}{\kappa p_0} \frac{\partial}{\partial t} p(x, t) \quad \text{mit} \quad \kappa = c_P/c_V \quad (2.1)$$

Eine Lösung der Wellengleichung $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ sind ebene Wellen: $u(x, t) = u_0 \sin(\omega t \pm kx - \phi)$ mit Kreiswellenzahl $k = 2\pi/\lambda$, Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ und Phasengeschwindigkeit $v_{ph} = \omega/k$. Ohne Dispersion entsprechen Phasen- und Gruppengeschwindigkeit $v_{gr} = \partial\omega/\partial k$ der Ausbreitungsgeschwindigkeit v , die für ein ideales Gas von der Temperatur T allein abhängig ist:

$$v = \sqrt{p_0 \cdot \kappa / \varrho} = v_0 \sqrt{T/T_0} \quad \text{mit} \quad v_0 = \sqrt{\frac{R \cdot \kappa}{M_{mol}}} T_0 \quad (2.2)$$

allg. Gaskonstante: $R = 8,3145 \text{ J/(mol K)}$
 Adiabatenexponent: $\kappa = 7/5$ für ein zweiatomiges Gas (N_2 , O_2)

Dichte:	ϱ
Molmasse von Luft:	$M_{mol} = 28,984 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/mol}$
üblicherweise wählt man:	$T_0 = 273,15 \text{ K } (=0^\circ\text{C})$

2.1.2.2 Stehende Wellen

In einem geschlossenen Rohr bilden sich durch Überlagerung von einlaufenden mit reflektierten periodischen Schallwellen stehende Wellen aus. Im Gegensatz zu frei laufenden (z.B. ebenen) Wellen gibt es hier Orte, an denen zu jeder Zeit die Schallschnelle oder der Schalldruck verschwinden (Knoten) und Zeiten, zu denen an jedem Ort Schalldruck oder Schnelle verschwinden. Befindet sich bei $x = 0$ ein schallharter Abschluss, so ist dort die Schallschnelle zu jeder Zeit $u_{x=0} = 0$ (Schnelleknoten) und die Amplitude des Schalldrucks extremal (Druckbauch). Allgemein gilt in einem Rohr der Länge L mit schallhartem Abschluss bei $x = 0$ und Schallquelle bei $x = L$ mit Schallschnelle $u(x = L, t) = u_L \cdot \sin \omega t$:

$$u(x, t) = \frac{u_L}{\sin kL} \sin kx \cdot \sin \omega t.$$

Damit ist der Effektivwert $\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(x, t) dt}$ des Schalldrucks

$$\hat{p}(x) = \varrho \cdot v \cdot u_L / \sqrt{2} \cdot \cos kx / \sin kL.$$

Die Druckknoten haben somit einen Abstand $\Delta x = \lambda/2$ und liegen bei:

$$x_n = n \cdot \lambda/2 - \lambda/4 \quad n = 1, 2, \dots \quad (2.3)$$

Am schallharten Abschluss bei $x = 0$ ist der Effektivwert des Schalldrucks:

$$\hat{p}_{x=0} = \frac{\varrho \cdot v \cdot u_L}{\sqrt{2}} / \sin \left(\frac{2\pi f}{v} L \right),$$

d.h. bei fester Rohrlänge L liegen Resonanzen bei

$$f_n = n \cdot v/2L, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (2.4)$$

und bei fester Frequenz f liegen Resonanzen bei

$$L_n = n \cdot v/2f, \quad n = 1, 2, \dots \quad (2.5)$$

2.1.3 Laufzeit gegen Laufstrecke

Wird die Laufzeit t einer Störung $a(x - vt)$ für verschiedene Orte x gemessen, so ergibt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit v als Steigungsfaktor der Auftragung x gegen t auch ohne absolute Ortskenntnis der Störquelle.

Hierzu werden Stoßwellen mit dem Piezo-Hochtonlautsprecher erzeugt und mit Sensor-CASSY aufgezeichnet. Abb. 2.1 zeigt den Aufbau. Am Tischende fixiert die Tischklemme die 50cm lange Alu-Schiene. An ihrem anderen Ende schließt sich die Rohr-Halterung an. Das Schallrohr wird mittig darauf gelegt und auf der

**Versuch
1A1**

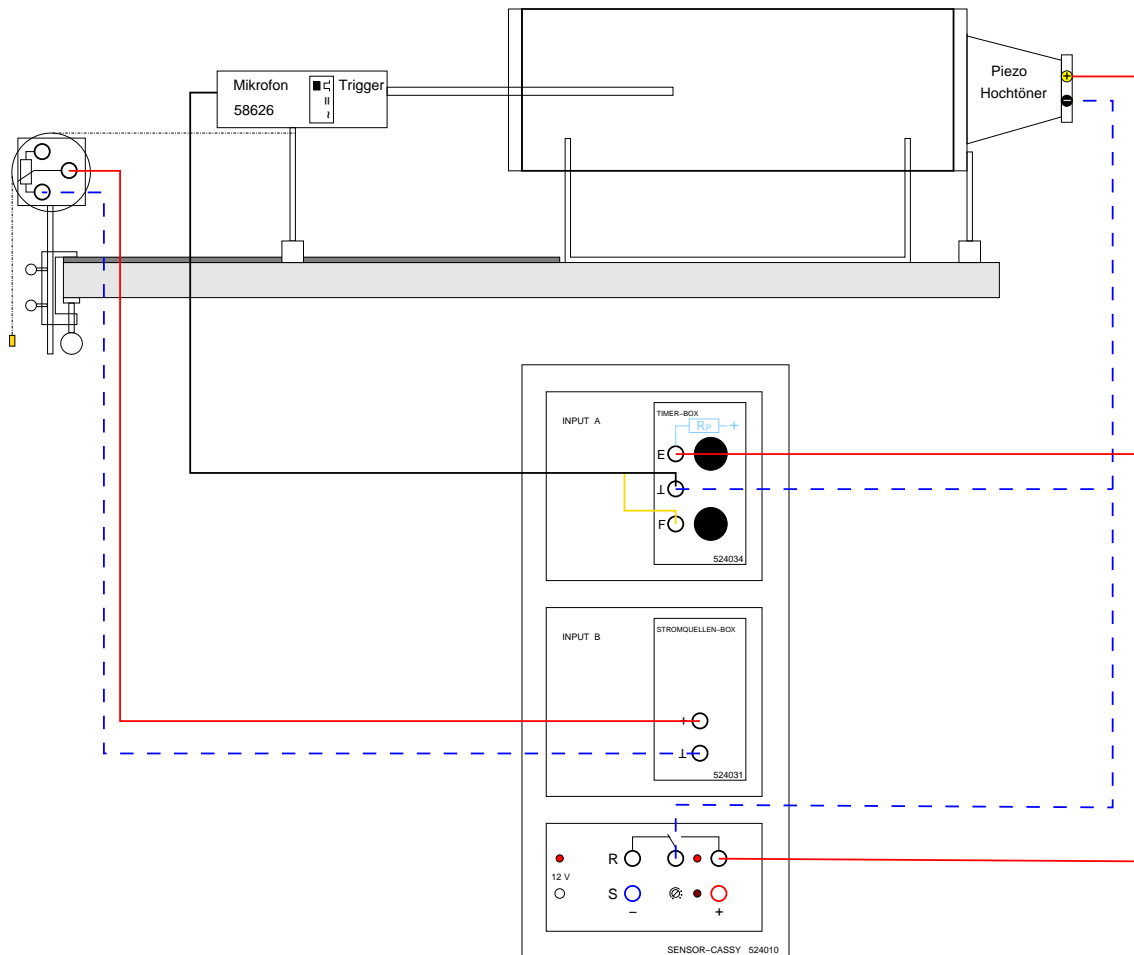


Abbildung 2.1: CASSY Messaufbau: Laufzeit gegen Laufstrecke. Der Wegaufnehmer und die zugehörige Stromquellenbox können gut durch ein unter dem Mikrofonsockel befestigtes Maßband ersetzt werden.

hinteren Seite mit dem Piezo-Hochtöner abgeschlossen. Der Rohrabschluss mit Durchführung wird auf die vordere Rohrseite gesteckt. Das eingeschaltete¹ Mikrofon wird im Trigger-Modus $\sim = \boxed{\text{---}\square\text{---}}$ auf mittlere Empfindlichkeit eingestellt und im Sockel auf der Alu-Schiene verschiebbar durch die mittige Durchführung in das Rohrrinnere geführt.

An Kanal A wird die Timer-Box angeschlossen. Sie benötigt zur Laufzeitmessung ein Start-Signal am Eingang E und ein Stop-Signal am Eingang F. An den Eingang E wird der Piezolautsprecher richtig herum gepolt (E an +/gelb) angeschlossen. Parallel dazu wird das rechte Relais-Schalterpaar (R2/R3) geschaltet. Schließt das Relais, wird das Piezoelement entladen und sendet eine Stoßwelle aus. Gleichzeitig fällt die am Eingang E intern anliegende Spannung auf 0V, Startzeit ist somit die negative Flanke an E. Öffnet der Relais Schalter, so wird das Piezoelement – über den internen 15 k Ω Widerstand R_P von Eingang E mit größerer Zeitkonstante

¹Das Mikrofon schaltet sich nach ca. 10 Min. selbständig aus, um die Batterie zu schonen. Bei Verschwinden des Signals ("kein Trigger") daher zuerst durch Wiedereinschalten dieses Problem ausschließen.

ohne messbare Schallaussendung – wieder auf +5V aufgeladen. Das Mikrofon im Triggermodus liefert bei Eintreffen der Stoßwelle das Stop-Signal und wird an Eingang F angeschlossen.

Zur Streckenmessung wird parallel zur Mikrofonachse ein Maßband unter dem Mikrofonsockel hindurch geführt und am Tisch oder an der Tischklemme befestigt. Die Mikrofonposition wird dann entweder direkt am Maßband abgelesen, oder es wird ein Wegaufnehmer (Mehrgangpotentiometer) verwendet, der über die Stromquellen-Box (liefert konstanten Strom) an Kanal B angeschlossen wird. Die Laufrichtung kann durch den Wechsel des Potentiometer-Endabgriffs umgekehrt werden. Vor der Messung sollte das Rad des Wegaufnehmers von Hand so eingestellt werden, dass zum einen der gesamte Verschieberegion des Mikrofons vermessen und zum anderen gleichzeitig ein möglichst kleiner Messbereich für den Widerstand verwendet werden kann.

Bei Verwendung des Wegaufnehmers muss dieser vor Beginn der Messungen gegen das Maßband kalibriert werden. Die Messunsicherheit auf die Kalibrationskonstante ist dann bei den folgenden Messungen als systematische Unsicherheit zu behandeln.

Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit wird die Laufzeit an mehreren Orten in geeigneten Abständen gemessen. Mit Start/Stop [F9] wird für einen Ort eine Messreihe gestartet und nach Aufnahme einer geeigneten Zahl an Messwerten wieder beendet. Wenn der Wegaufnehmer nicht verwendet wird, wird die Position des Mikrofonsockels für jede Position im Messprotokoll vermerkt. Die aufgenommenen Messreihen werden zur weiteren Auswertung in einer Datei gespeichert. Um mögliche systematische Effekte zu studieren, wird die Messung einmal mit und einmal ohne das Plexiglasrohr durchgeführt.

CASSY-Lab Tipp zur Aufzeichnung der Messwerte, der Messbereich für die Laufzeitmessung ist dabei geeignet zu wählen:

```
CASSY      / Kanal A / Laufzeit Dta1 E->F, Flanken invertiert
           Relais / frac(time)<0.1 (periodisches Schalten)
Messparameter / automatisch Intervall 1s
                neue Messreihen anhängen
```

Es gilt: $S = S_0 + v \cdot t$. Eine Geradenanpassung an S gegen t liefert als Steigungsfaktor die Schallgeschwindigkeit v bei Raumtemperatur T , als y-Achsenabschnitt die Position S_0 der Schallquelle. Die Schallgeschwindigkeit wird mit der Erwartung nach Gl. 2.2 verglichen. Dazu ist eine Messung der Lufttemperatur nötig. Eine Funktion zur Berechnung der erwarteten Schallgeschwindigkeit findet sich in der Praktikumsbibliothek.

Messung mit dem Oszilloskop Der Messprozess lässt sich gut mithilfe des Oszilloskops veranschaulichen. Dazu wird das zwischen Eingang E und Erde \perp an der Timer-Box abgegriffene Signal auf CH1 des Oszilloskops gegeben, und analog das zwischen Eingang F und Erde \perp abgegriffene Signal auf CH2. Nach Einstellen eines geeigneten Triggers können Start- und Stoppsignal beobachtet werden und aus ihrer zeitlichen Differenz kann wiederum die Laufzeit in Abhängigkeit der Mikrofonposition gemessen werden.

Um die Darstellung auf dem Oszilloskopschirm zu speichern, wird ein USB-Stick benötigt. Wird beim Einstecken eine entsprechende Fehlermeldung angezeigt, muss dieser zunächst formatiert werden (Achtung: alle gespeicherten Daten gehen dabei verloren!). Dies geschieht, indem man das Menü **Dienstpgm./Utility** aufruft und den entsprechenden Unterpunkt auswählt. Um für das Protokoll möglichst brauchbare Bilder zu erzeugen, empfiehlt es sich, folgende Einstellungen vorzunehmen: **Dienstpgm./Utility** → **Optionen** → **Drucker einrichten**, dann das Bildformat auf **Querformat** und das Dateiformat auf **EPSIMAGE** stellen. Danach wird mit einem Druck auf den **Print**-Knopf die aktuelle Darstellung auf den USB-Stick gespeichert.

2.1.4 Resonanzfrequenzen einer stehenden Welle

2.1.4.1 Messung mit CASSY-System

Versuch 1A2

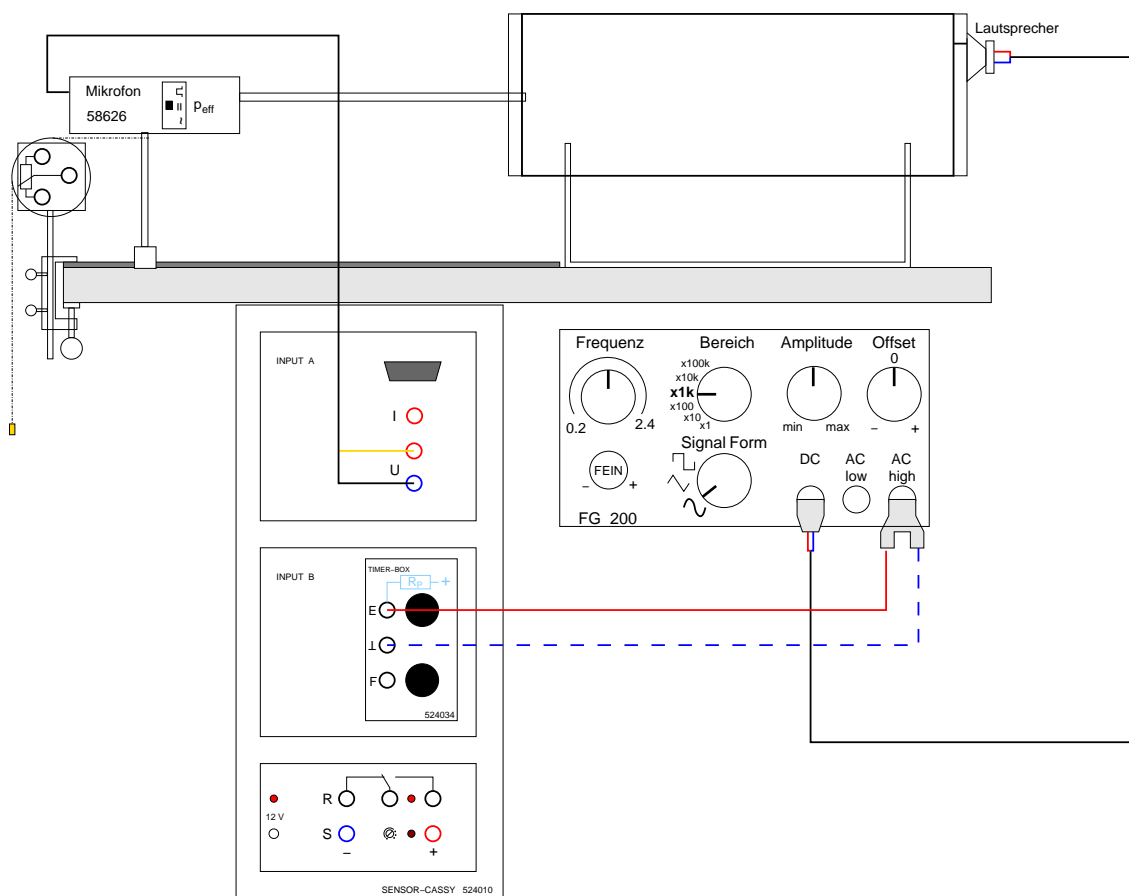


Abbildung 2.2: CASSY Messaufbau: Resonanzfrequenzen einer stehenden Welle. Der Wegaufnehmer kann durch ein unter dem Mikrofonsockel befestigtes Maßband ersetzt werden.

Gemessen wird die Frequenz-Abhängigkeit der Schalldruckamplitude einer stehenden Welle am schallharten Abschluss bei fester Resonatorlänge. Abb. 2.2 zeigt den Aufbau. Das Mikrofon im Effektivwertmodus $\sim \square \square \square$ wird an das Rohrende

verschoben, um am schallharten Abschluss im Druckbauch die Schalldruckamplitude zu messen. Es wird direkt an Sensor-CASSY Kanal A angeschlossen.

Als Schallquelle dient der Lautsprecher in der Kappe, die das Rohr am hinteren Ende abschließt, um Sinusschwingungen zwischen 200 Hz und 2400 Hz zu erzeugen. Angeregt wird er vom Funktionsgenerator, der folgendermaßen eingestellt wird:

Signalform	~	(Sinusschwingung)
Bereich	x1k	(0.2 - 2.4 x 1 kHz)
Offset	0	(kein Konstantstrom durch den Lautsprecher)
Amplitude	mittig	(Minimum für sichere Frequenzmessung)

Um hohe Resonanzfrequenzen zu erreichen, muss der Bereich ggfs. später auf x10k umgestellt werden. Der Lautsprecher wird mit dem BNC-Lemo-Adapter an den niederohmigen DC-Ausgang angeschlossen. Zur Frequenzmessung wird der rechte Hochpegel AC-Ausgang an den Eingang E der CASSY Timer-Box in Sensor-CASSY Kanal B angeschlossen.

Vor der Aufnahme der Messwerte empfiehlt es sich, den dynamischen Bereich des Mikrofon-Kanals an die maximale Schalldruckamplitude bei Resonanz anzupassen, d.h. die Empfindlichkeit des Mikrofons möglichst niedrig einstellen und ggfs. die Amplitude am Funktionsgenerator erhöhen, um den gewählten Messbereich von CASSY Kanal A optimal auszunutzen.

CASSY-Lab Tipp zur Aufzeichnung der Messwerte:

```
CASSY / Kanal A / Spannung Ua1 0-Umax Nullpunkt links, gemittelt 1s
      Kanal B / Timerbox / Frequenz fb1(E) 5000 Hz Torzeit 1s
Messparameter / manuell
```

Nach Einstellen einer Frequenz und Stabilisierung des Frequenzwerts wird mit Start/Stop [F9] ein Messwert pro Frequenz aufgenommen. Die Wahl der weiteren Frequenzwerte sollte auf die optimale Bestimmung der Resonanzfrequenzen ausgerichtet sein. Abb. 2.3 zeigt eine solche Messung. Wie zu erkennen ist, sind diese Resonanzen recht schmal. Daher empfiehlt es sich, deren Lage vorher abzuschätzen. Mit der Frequenz-Feineinstellung kann ein Resonanzbereich dann komplett durchgestimmt werden. Zur quantitativen Auswertung werden die Messungen in einer Datei abgespeichert. Es werden die Resonanzfrequenzen f_n bestimmt und über n aufgetragen. Nach Gl. 2.4 liegen diese Werte auf einer Geraden mit Steigung $v/2L$. Bei bekannter Resonanzlänge L des Rohres (zwischen den Endkappen) wird mit dieser Messung die Schallgeschwindigkeit v bestimmt.

2.1.4.2 Messung mit dem Oszilloskop

Gemessen wird die Frequenz-Abhängigkeit der Schalldruckamplitude einer stehenden Welle am schallharten Abschluss bei fester Resonatorlänge. Der Aufbau ist wie in Abb. 2.4. Das Mikrofon im Amplitudenmodus $\boxed{\sim} = _ \square _$ wird an das Rohrende verschoben, um am schallharten Abschluss im Druckbauch die Schalldruckamplitude zu messen. Es wird direkt an den Kanal CH2 des Oszilloskops

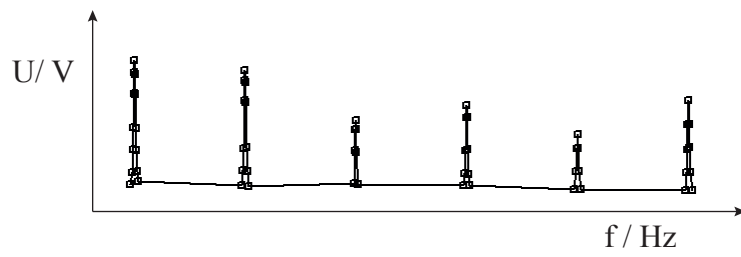


Abbildung 2.3: Messung der Schalldruckamplitude gegen die Frequenz (schematisch).

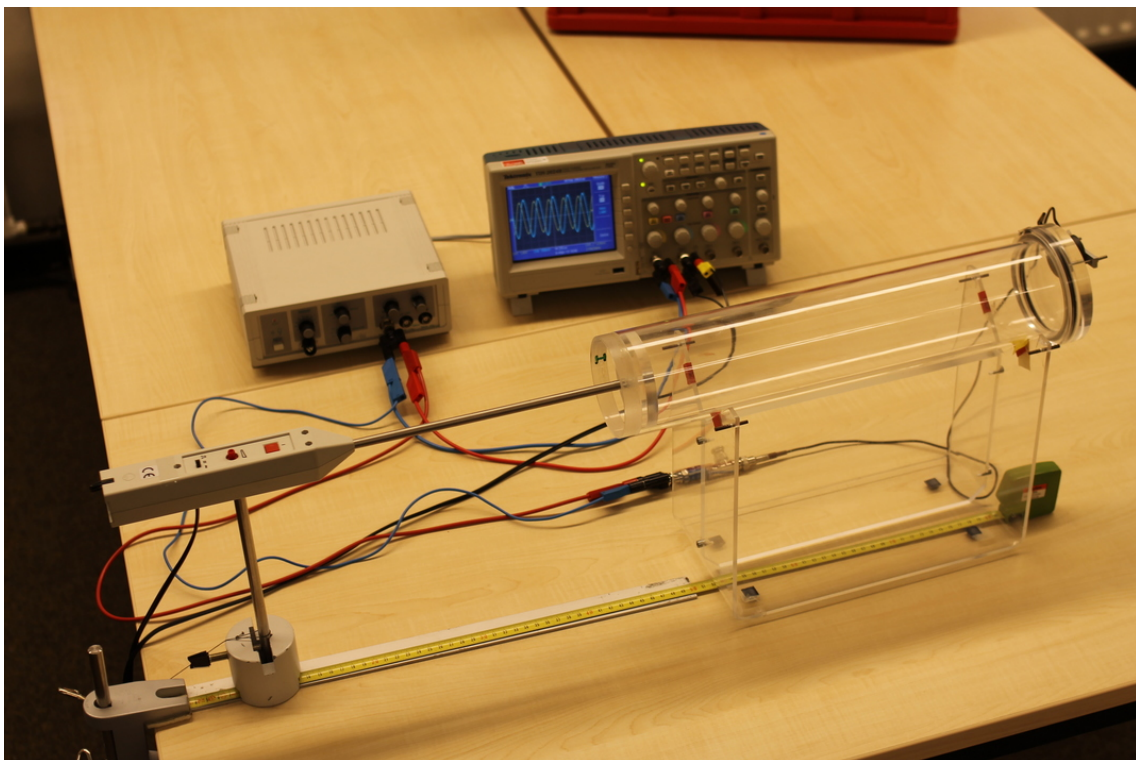


Abbildung 2.4: Messaufbau Schalldruck gegen Resonanzfrequenz mit dem Oszilloskop

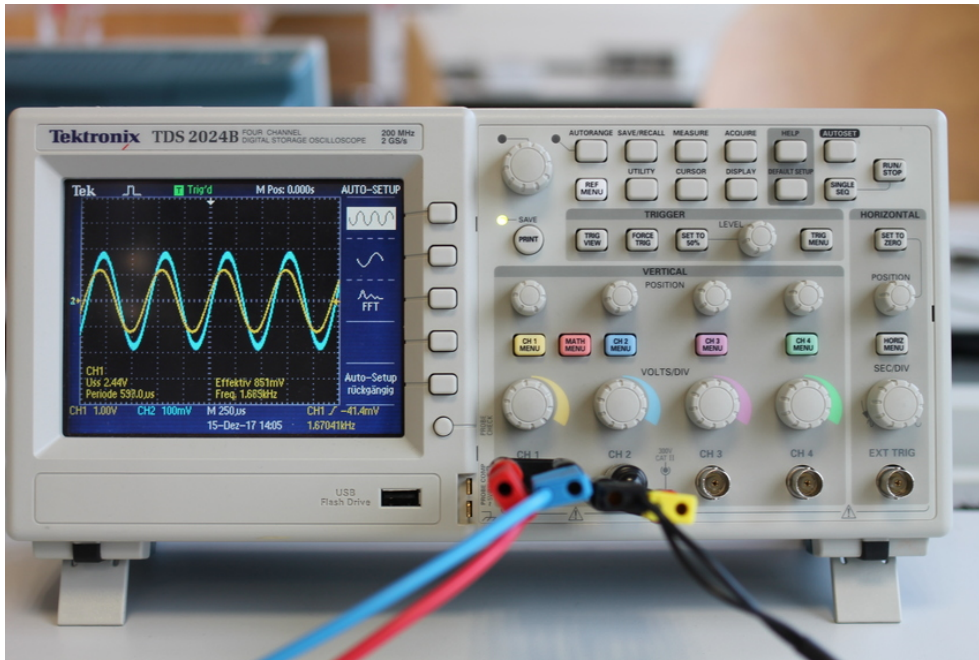


Abbildung 2.5: Signalansicht am Oszilloskop

angeschlossen.

Als Schallquelle dient der Lautsprecher in der Kappe, die das Rohr am hinteren Ende abschließt, um Sinusschwingungen bis zu einigen kHz zu erzeugen. Angeregt wird er vom Funktionsgenerator, der wie oben beschrieben eingestellt wird. Der Lautsprecher wird mit dem BNC-Lemo-Adapter an den niederohmigen DC-Ausgang des Generators angeschlossen, am besten mit einem dazwischen geschalteten Abschwächer von 6 dB. Parallel dazu wird das Generatorsignal auf den Kanal CH1 des Oszilloskops geführt. Auf seinem Schirm sind zwei phasenverschobene Sinusschwingungen wie in der Abb. 2.5 dargestellt.

Zur Messung wird nun die Frequenz f_i am Generator vorsichtig verändert, bis sich am Mikrofon wieder eine maximale Schallamplitude einstellt; die Frequenz wird notiert. Anschließend wird die Generatorfrequenz weiter variiert, bis n maximale Schalldruckamplituden gemessen wurden. Aus der grafischen Antragung f_i über n wird die Steigung Δ benutzt, um mit Hilfe der Gleichung $\Delta = v/(2L)$ die Schallgeschwindigkeit v zu bestimmen. Dabei ist L die gemessene, hier festgehaltene, Resonatorlänge.

2.1.5 Resonanzlängen einer stehenden Welle

Anstatt die Resonanzfrequenzen bei fester Rohrlänge zu bestimmen, kann auch bei einer festen Frequenz gemessen werden und durch Verschieben der Abschlusscheibe die Rohrlängen bestimmt werden, bei denen Resonanz auftritt. Der Versuchsaufbau ist weitgehend identisch mit dem in Abb. 2.2 gezeigten. Vor der eigentlichen Messung wird die höchste zuvor gemessene Resonanzfrequenz eingestellt und mit der Timer-Box am Kanal B des Sensor-CASSYs gemessen. Sodann

werden durch Verschieben der Abschlusscheibe die Resonanzlängen ausgemessen. Die Strecke kann entweder direkt am Maßband oder durch Verwendung des zuvor kalibrierten Wegaufnehmers gemessen werden.

Zur Auswertung werden die Resonanzlängen L_n bestimmt und über n aufgetragen. Nach Gl. (2.5)) liegen diese Werte auf einer Geraden mit Steigung $v/2f$. Bei bekannter Frequenz f wird mit dieser Messung die Schallgeschwindigkeit v bestimmt.

2.1.6 Druckknoten einer stehenden Welle

2.1.6.1 Messung mit CASSY-System

Gemessen wird das Schalldruckprofil einer stehenden Welle, also die Ortsabhängigkeit der Schalldruckamplitude entlang des Rohrs. Abb. 2.2 zeigt den Aufbau. Das Mikrofon im Effektivwertmodus $\sim \boxed{\equiv} _ \square _$ wird nun direkt an CASSY Kanal A angeschlossen und ansonsten wie in Versuch 2.1.3 durch die mittige Öffnung der Abschlusskappe ins Rohrrinnere geführt.

Als Schallquelle dient der Klein-Lautsprecher in der Kappe, die das Rohr am hinteren Ende abschließt. Mit dem BNC-Lemo-Adapter wird er an den niederohmigen DC-Ausgang des Funktionsgenerators angeschlossen und dieser wie oben angegeben betrieben. Vor der eigentlichen Messung wird die Mikrofonspitze am Rohrende positioniert und eine möglichst hohe Resonanzfrequenz eingestellt. Diese wird mit der Timer-Box an CASSY Kanal B gemessen. Die Mikrofonposition wird wie bei Messung 2.1.3 entweder direkt mit einem unter dem Mikrofonsockel parallel zur Mikrofonachse geführten und am Tisch befestigten Maßband oder mit dem zuvor kalibrierten Wegaufnehmer gemessen. In letzterem Fall muss die Timer-Box vor Beginn der eigentlichen Messung durch die Stromquellen-Box ersetzt werden, an die der Wegaufnehmer angeschlossen wird. Vor Aufnahme einer Messreihe sollte der dynamische Bereich des Mikrofonkanals an den Maximalwert im Druckbauch angepasst werden.

CASSY-Lab Tipp zur Aufzeichnung der Messwerte:

```
CASSY / Kanal A / Spannung Ua1 0-Umax Nullpunkt links, gemittelt 1s
      Kanal B / Timerbox / Frequenz fb1(E) 5000 Hz Torzeit 1s
Messparameter / manuell
```

Nach Einstellen einer Position wird mit Start/Stop [F9] ein Messwert aufgenommen. Die Wahl der weiteren Positionen sollte wie in Abb. 2.6 auf die optimale Bestimmung der Druckknoten und -Bäuche ausgerichtet sein. Es werden die Positionen x_n der Druckknoten bestimmt und über n aufgetragen. Nach Gl. (2.3) liegen diese Werte auf einer Geraden mit Steigung $\lambda/2$. Mit $v = \lambda f$ wird aus diesen Messungen die Schallgeschwindigkeit bestimmt.

2.1.6.2 Messung mit dem Oszilloskop

Zur Messung des Schalldruckprofils mit dem Oszilloskop ist der Aufbau analog zu Abb. 2.4, nur dass das Endstück mit Durchführung anstelle der im Rohr ver-

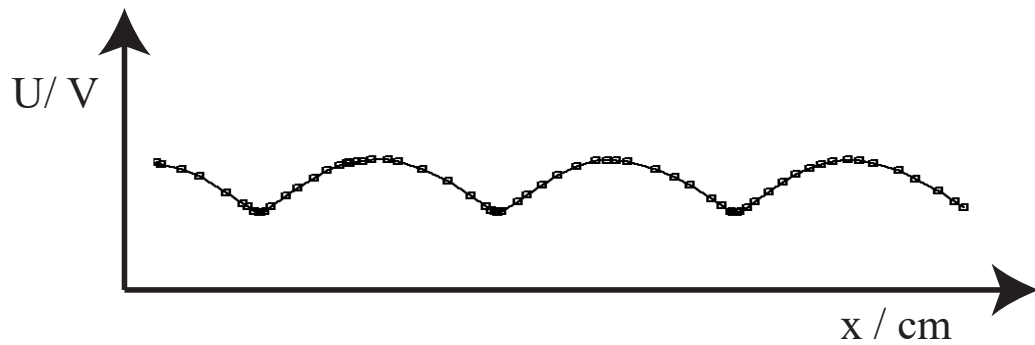


Abbildung 2.6: Messung der Schalldruckamplitude gegen den Ort (schematisch).

schiebbaren Scheibe verwendet wird. Der Lautsprecher wird mit dem BNC-Lemo-Adapter an den niederohmigen DC-Ausgang des Generators angeschlossen, am besten mit einem dazwischen geschalteten Abschwächer von 6 dB. Parallel dazu wird das Generatorsignal auf den Kanal CH1 des Oszilloskops geführt. Das Mikrofon wird direkt an den Kanal CH2 des Oszilloskops angeschlossen und im Amplitudenmodus $\boxed{\sim} = \boxed{\square}$ betrieben. Zunächst platziert man die Spitze des Mikrofons am Rohrende und stellt eine möglichst hohe Resonanzfrequenz ein. Ihr Wert kann aus dem Schwingungsverlauf am Oszilloskop abgelesen und mit der Anzeige im Display des Oszilloskops verglichen werden. Dann verschiebt man langsam den Mikrofonsockel und beobachtet die Änderung der Amplitude. Die Druckknoten lassen sich besonders genau bestimmen, weil die Amplitude dort gerade verschwindet. Man notiert die jeweiligen Positionen x_n des Mikrofonsockels. Für eine Anleitung zum Abspeichern der Oszilloskopbilder sei auf Abschnitt 2.1.3 verwiesen.

2.2 Schallgeschwindigkeit in Festkörpern

2.2.1 Versuchsziel

Versuch 1A3 Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Metallen durch Messung der Schallgeschwindigkeit.

Vorkenntnisse:	Wellen Schallausbreitung in Festkörpern Überlagerung von Wellen Stehende Wellen Fourier-Analyse	
Benötigte Geräte:	Sensor CASSY Universalmikrofon mit Stativstange Sockel Tischklemme Metallstange 20cm Kreuzmuffe Metallstift \varnothing 4mm L 30mm Gummi-Hammer Mikrometerschraube 0-25mm Stahl-Bandmaß 2m verschiedene Metallstangen Analysewaage Sartorius	1x 1x 1x 1x 1x 1x 1x 1x 1x 1x 4x im Raum

2.2.2 Grundlagen

Der Elastizitätsmodul E ist eine Materialkonstante und charakterisiert die relative Längenausdehnung eines Materials abhängig von der angreifenden Zugspannung,

$$E = \frac{F/A}{\Delta L/L}. \quad (2.6)$$

Für Metalle ist E in der Größenordnung von 10^{11} N/m^2 und damit nur für dünne Drähte statisch messbar. Mit Metallstäben ist jedoch eine dynamische Messung möglich, indem die Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$v_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.7)$$

von longitudinalen Schallwellen bestimmt wird.

Ein mittig eingespannter Stab der Masse M , Länge L und mit Durchmesser D wird durch Anschlagen mit einem Gummihammer entlang der Längsachse zur

longitudinalen Grundschiwingung der Wellenlänge $\lambda_0 = 2L$ angeregt. Die Frequenz f_0 wird gemessen. Mit der Schallgeschwindigkeit im Stab

$$v_l = f_0 \cdot \lambda_0 \quad (2.8)$$

und der Dichte

$$\rho = M/\pi L(D/2)^2 \quad (2.9)$$

ergibt sich

$$E = \frac{16f_0^2 LM}{\pi D^2}. \quad (2.10)$$

2.2.3 Versuchsdurchführung

Zunächst wird der Stab zur Bestimmung der Dichte ausgemessen:

- a Länge L mit dem Bandmaß,
- b Durchmesser D mit der Mikrometerschraube, gemittelt über mehrere Positionen entlang des Stabs und in zwei um 90° versetzten Orientierungen, um einer möglichen Elliptizität Rechnung zu tragen, sowie
- c Masse M auf der Analysewaage der Marke Sartorius, Toleranzangabe laut Hersteller $\pm 0,2$ g.

Die Mikrometerschraube entspricht DIN 863-1, was eine (systematische) Genauigkeit von $\pm 4 \mu\text{m}$ in dem hier relevanten Dickenbereich bedeutet.

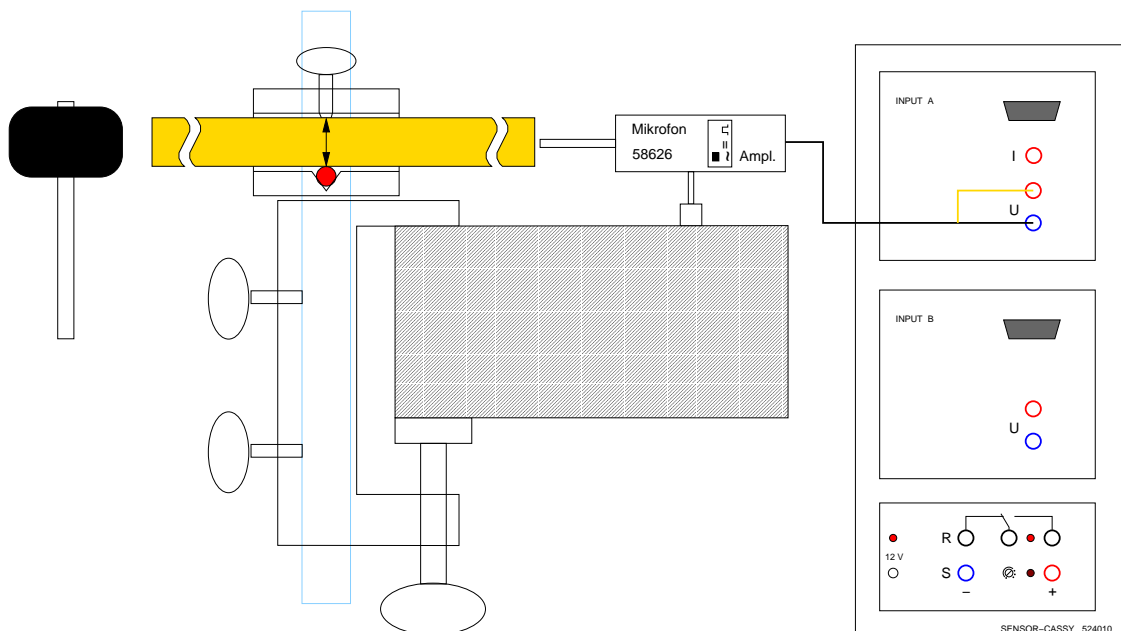


Abbildung 2.7: CASSY Messaufbau Schallgeschwindigkeit in Stäben

Abb. 2.7 zeigt den mechanischen Aufbau zusammen mit der Sensor-CASSY Datenaufnahme. Die Kreuzmuffe wird an der kurzen Metallstange mit der Tischklemme am Tisch befestigt. Der Metallstab wird – von einem Metallstift unterstützt – parallel zur Tischfläche so in der Kreuzmuffe eingespannt, dass er nur an zwei Punkten (Pfeile) gehalten wird und damit frei schwingen kann.

Als Messaufnehmer dient das Mikrofon. Es wird im Amplitudenmodus $\boxed{\sim} = _ \sqcap _$ in ca. 5 mm Abstand vom Stabende aufgestellt und eingeschaltet². Die Empfindlichkeit muss über den Drehregler je nach zu vermessenem Material so angepasst werden, dass der dynamische Bereich des Mikrofons von ca. 2,5 V ausgenutzt wird, aber ohne dass das Mikrofon in Sättigung gebracht wird.

Aufgezeichnet werden die Messwerte mit dem Sensor CASSY. Bei geeigneter Einstellung der Zeitbasis können sowohl die Schwingungen als auch deren Fast-Fourier-Frequenzspektren (FFT) dargestellt werden.

Der Messbereich für die Mikrofon-Spannung ist geeignet zu wählen. CASSY-Lab Tipp zur Aufzeichnung der Messwerte:

```
CASSY          / Kanal A /      Spannung Ua1
Messparameter  / automatisch
Darstellung    / X-Achse  t
                / Y-Achse  Ua1
FFT            / Fast Fourier Transformation von Ua1
```

Angeregt wird die Schwingung durch einen leichten Schlag auf das Stabende mit dem Gummihammer. Der Anschlag wird solange variiert, bis der Höreindruck bzw. das Frequenzspektrum eine saubere Anregung der Grundschiwingung zeigt. Bessere Ergebnisse werden erzielt, wenn die Messung mit F9 erst im Ausklingen der Schwingung gestartet wird, da so die Einschwingvorgänge direkt nach dem Anschlagen nicht mit aufgezeichnet werden. Mehrere Schwingungen mit etwa 1000 Perioden sowie deren FFT-Spektren einschließlich der Bestimmung des Peakschwerpunktes von f_0 werden zur weiteren Auswertung abgespeichert. Untersuchen Sie, inwieweit der gemessene Wert für f_0 von der genauen Lage (Verschiebung in Längs- oder Querrichtung bzw. Drehung um die Längsachse) des Stabs in der Kreuzmuffe oder von der Kraft, mit der der Stab in der Kreuzmuffe eingespannt wird, abhängt. Schätzen Sie daraus eine systematische Unsicherheit auf f_0 ab.

Der Versuch wird mit mehreren Stäben aus unterschiedlichen Materialien wiederholt. Die Messungen sollten mit den anderen Gruppen im Raum koordiniert werden, denn ein weiterer zur selben Zeit angeschlagener Metallstab gleichen Materials würde die Messung verfälschen. Ein zur selben Zeit angeschlagener Metallstab anderen Materials ist im Fourier-Spektrum problemlos bei seiner Frequenz zu erkennen und beeinträchtigt wegen der schmalen Linienbreite die Auswertung nicht.

²Das Mikrofon schaltet sich nach ca. 10 Minuten selbständig aus, um die Batterielaufzeit zu verlängern. Bei Verschwinden des Signals daher zuerst durch Wiedereinschalten dieses Problem ausschließen.

2.2.4 Auswertung der Messdaten

Aus dem diskreten FFT-Frequenzspektrum wird f_0 aus der Peaklage der Grundschwingung bestimmt. Die Messunsicherheiten auf ϱ und E ergeben sich durch Gauß'sche Fehlerfortpflanzung an die Gleichungen (2.9) und (2.10). Dabei wird die statistische Messunsicherheit auf f empirisch durch Wiederholungsmessung bestimmt. Eine weitere systematische Unsicherheit auf f_0 , die durch die Methodik der Peakbestimmung herrührt, lässt sich abschätzen, indem der verwendete Algorithmus (Lage und Anzahl der verwendeten Punkte im Frequenzspektrum) innerhalb sinnvoller Grenzen verändert wird.

Die statistische Messunsicherheit auf den Mittelwert von D wird aus der empirischen Standardabweichung der Messwerte an verschiedenen Positionen und in zwei Orientierungen entlang der Stange berechnet. Bei sorgfältiger Vorgehensweise werden sich für L und M die jeweiligen Ablesefehler an Maßband bzw. Waage ergeben. Die relative Größe der einzelnen Fehlerbeiträge ist im Protokoll zu diskutieren.

Die gemessenen Werte für ϱ und E sollen mit bekannten Legierungen verglichen werden. Dafür kann man zum Beispiel die Datenbank unter www.matweb.com verwenden ("Physical Properties", dann "Density" und "Modulus of Elasticity" auswählen und sinnvolle Bereiche um die gemessenen Werte herum eingeben).

2.3 Physik der Gitarre

2.3.1 Versuchsziele

Versuch 1A4 An der Gitarre können viele physikalische Phänomene, die im Zusammenhang mit Schwingungen und Wellen auftreten, sehr anschaulich und unmittelbar studiert werden.

2.3.2 Grundlagen

Vorkenntnisse: Wellen
Überlagerung von Wellen, Schwebungen
Fourier-Analyse
Gitarre: Aufbau und Funktionsweise
Grundlagen der Musiktheorie (Notenskala und Intervalle)

Benötigte Geräte:	Sensor CASSY	1x
	Universalmikrofon mit Stativstange	1x
	Sockel	1x
	Akustik-Gitarre	1x

2.3.2.1 Aufbau der Gitarre

Die Bauweise einer Gitarre hat einen erheblichen Einfluss auf den Klang des Instruments. Für den Klang spielen sowohl die Form, als auch das Material der einzelnen Komponenten eine entscheidende Rolle. Der Aufbau einer Akustik-Gitarre ist in Abbildung 2.8 gezeigt.

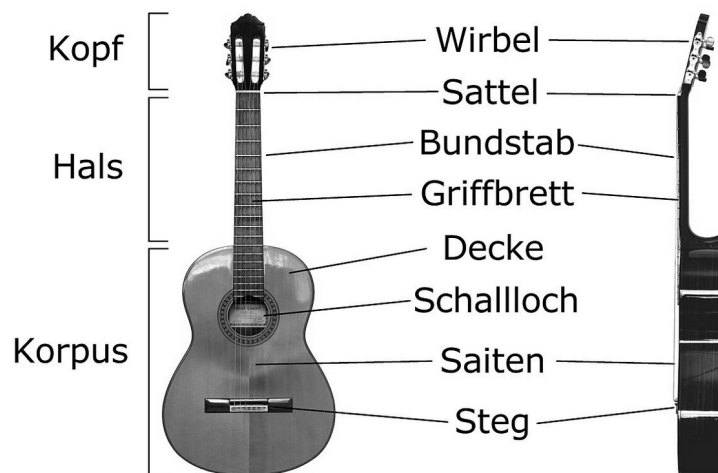


Abbildung 2.8: Aufbau einer Konzertgitarre. (Quelle: Martin Möller, März 2006, wikipedia.org)

Die Konzertgitarre wird mit insgesamt sechs Nylonsaiten bespannt, wovon die oberen drei Saiten komplett aus Kunststoff bestehen und die unteren drei zusätzlich mit feinen Metallfäden umwickelt sind. Die Saiten gehören zur Serie 'Pro Arté .EJ44' der Marke D'Addario. Der Hersteller gibt dabei Produktspezifikationen wie die Saitenspannung und den Massebelag der Saiten an. Standardmäßig wird die tiefste Saite, also die 6. Saite - leer angeschlagen - auf ein E (82,41Hz) gestimmt und die höchste auf ein e' (329,63Hz), was einem Intervall von zwei Oktaven entspricht. Die Frequenzen der einzelnen Saiten finden sich in Tab. 2.1 wieder. Abb. 2.9 zeigt das dazugehörige Notenbild. Die Gitarre gehört zu den oktav transponierenden Musikinstrumenten. Sie klingt demnach eine Oktave tiefer, als im Notenbild mit Violinschlüssel notiert. Nur so können die Töne der Gitarre im 5-Linien-System sinnvoll dargestellt werden. Die Stimmung ist so gewählt, dass das Intervall zur nächsthöheren Saite in der Regel einer Quarte entspricht und zwischen g und b einer großen Terz. Die Frequenzen sind bezogen auf den Kammerton $a' = 440$ Hz. Das Griffbrett mit den Bundstäbchen erlaubt es dem

Saite	Note	Frequenz [Hz]
1	e'	329,63
2	b	246,94
3	g	196,00
4	d	146,83
5	A	110,00
6	E	82,41

Tabelle 2.1: Frequenzen der Leersaiten.

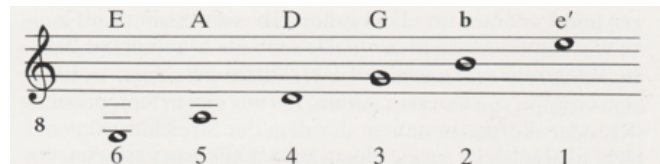


Abbildung 2.9: Notenbild der Gitarrenstimmung.

Gitarrenspieler, Töne abzugreifen. Dabei entspricht der Abstand zwischen zwei Bundstäbchen genau einem Halbtonschritt. Greift man beispielsweise die tiefe E-Saite im 1. Bund, so klingt die Saite als F. Greift man diese im 5. Bund, so klingt ein A mit der gleichen Frequenz wie die nächsthöhere Leersaite. Die klassische Gitarre hat in der Regel 20 Bünde. Dies bietet die Möglichkeit, identische Töne auf verschiedenen Saiten und damit in verschiedenen Lagen auf dem Griffbrett spielen zu können. Da die Saiten unterschiedlich beschaffen sind, lässt sich dadurch die Klangfarbe der Töne beeinflussen. Im Allgemeinen strahlt die Gitarre im Bereich zwischen 200 Hz und 400 Hz und um 1000 Hz am günstigsten ab. Die Abstrahlung wird ab 1200 Hz schwächer und ist ab 4000 Hz kaum noch präsent.

2.3.2.2 Grund- und Oberschwingungen einer Saite

Schlägt man eine Saite an, breiten sich Schwingungen als Transversalwelle in beide Richtungen entlang der Saite aus und werden jeweils an Steg und Sattel reflektiert. Dabei kommt es durch Reflexion der Wellen an den Enden zu stehenden Wellen auf der Saite. Abb 2.10 zeigt die Reflexion einer Welle am fixierten Ende. Entscheidend ist, dass am festen Ende ein Phasensprung von $\Delta\phi = 180^\circ$ auftritt. Durch die Überlagerung der beiden Teilwellen bildet sich daher eine stehende Welle auf der Saite aus.

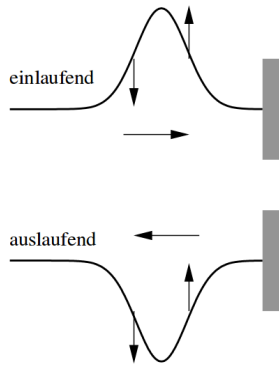


Abbildung 2.10: Reflexion einer Transversalwelle am fixierten Ende.

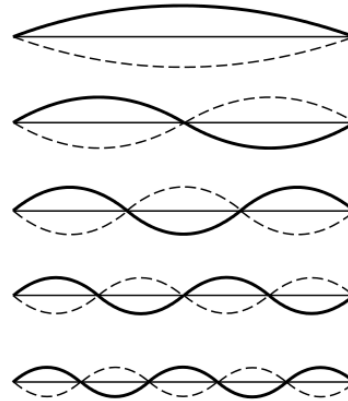


Abbildung 2.11: Stehende Welle und deren Harmonische bis $n = 5$.

Bei der Grundschwingung befinden sich die Knoten jeweils an den Saitenenden, wodurch die Wellenlänge $\lambda_1 = 2L$ gegeben ist. Neben der Grundschwingung bilden sich aufgrund der Eigenmoden weitere, sogenannte Oberschwingungen aus. Da die Oberschwingungen an den Enden ebenfalls Knoten ausbilden, folgen die Wellenlängen einer festen Beziehung:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad \text{mit} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.11)$$

Für $n = 1$ erhält man die Grundschwingung und für $n \geq 2$ die Oberschwingungen. Bei einer angeschlagenen Gitarrensaite existieren diese gleichzeitig. Wahrgenommene Töne bestehen somit immer aus Grund- und Oberschwingungen, welche der Gleichung 2.11 genügen. Dieses Phänomen soll in den späteren Messungen gezeigt werden.

2.3.2.3 Das Frequenzspektrum einer Saite

Die Auslenkung der Saite bei Ausprägung einer stehenden Welle lässt sich als Summe ihrer Moden schreiben:

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(\omega_n t + \phi_n) \sin(k_n x)$$

Am einfachsten kann man sich dies bei einer Saite vorstellen, die in der Mitte angeschlagen wird. Abb. 2.12 zeigt die Bewegung einer im Mittelpunkt angeschlagenen Saite für eine halbe Periode. Die beiden Transversalwellen werden zeitgleich an den Enden reflektiert und überlagern sich nach einer halben Periode wieder im Mittelpunkt der Saite, so dass diese wieder maximal ausgelenkt ist. Für diesen Bewegungsverlauf dürfen nicht alle Schwingungsmoden auftreten, sondern nur diejenigen, in dessen Zentrum sich ein Schwingungsbauch mit maximaler Auslenkung befindet. Dies entspricht allen ungeraden Harmonischen, wie in Abb. 2.12 dargestellt. Zudem müssen diese abwechselnd eine Phasenverschiebung von $\Delta\phi = 180^\circ$ aufweisen, damit im Zentrum der Saite ausschließlich positive Interferenz auftritt und diese eine maximale Auslenkung erfährt. Das Frequenzspektrum des erzeugten Klangs enthält in diesem Fall nur alle ungeraden Vielfachen der Grundfrequenz. Die n -te Harmonische hat bezüglich zur Grundschwingung die Amplitude $1/n$.

Das entstehende Frequenzspektrum ist demnach abhängig vom Anschlagspunkt der Saite und kann vielfältig ausgeprägt sein. Abb. 2.13 zeigt das Frequenz-

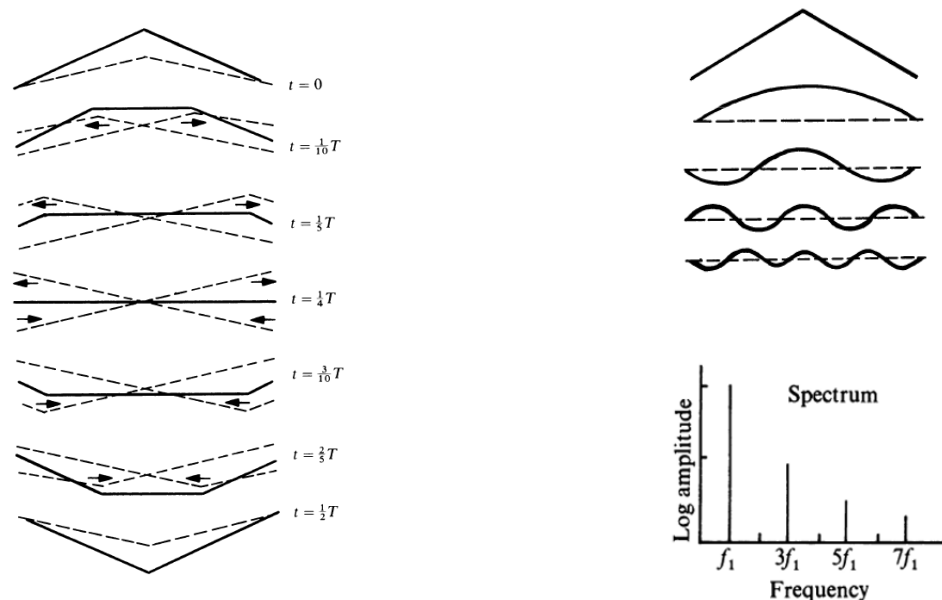


Abbildung 2.12: Bewegungsverlauf und erzeugtes Klangspektrum einer Saite, in der Mitte angeschlagen (aus [2]).

spektrum einer Saite, wenn man diese bei einem Fünftel ihrer Länge anschlägt. Hier fehlt jede fünfte Harmonische und deren Vielfache, da sich dort kein Schwingungsknoten ausbilden kann. Dieses Schema lässt sich für jeden Anschlagspunkt fortführen. Wird die Saite im Abstand $d = L/n$ angeschlagen, so fehlen die n -te Harmonische und ihre Vielfachen. Dieses Verhalten wird ebenfalls im Experiment untersucht. Dazu werden verschiedenen Anschlagspunkte der Saite gewählt, um die unterschiedlichen Klangspektren zu erzeugen.

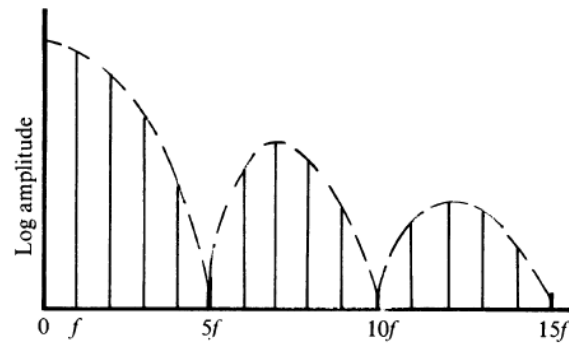


Abbildung 2.13: Erzeugtes Frequenzspektrum einer Saite, angeschlagen bei einem Fünftel ihrer Länge. (Vgl. 2, S.42)

2.3.3 Versuchsaufbau

Vor jeder Messung wird die Gitarre mit einem Stimmgerät gestimmt. Dieses liefert eine Stimmgenauigkeit von ± 1 Cent, was einem hundertstel eines Halbtonschritts entspricht. Als Mikrofon wird ein Schalldruckempfänger der Firma LEYBOLD DIDACTIC GmbH verwendet, welcher in der Lage ist, über einen Tonfrequenzbereich von 30 Hz bis 20 kHz mit konstanter Empfindlichkeit aufzunehmen. Der durchschnittliche, hörbare Frequenzbereich eines Erwachsenen liegt bei etwa 20 Hz bis 15 kHz. Das Mikrofon ist damit für alle vorgenommenen Messungen geeignet. Für die Messdatenaufnahme wird dieses mit dem Sensor-CASSY Interface verbunden und im Amplitudenmodus $\boxed{\sim} = \boxed{\square}$ betrieben. Die Empfindlichkeit des Mikrofons muss so eingestellt werden, dass eine sinnvolle Datenaufzeichnung möglich ist.

Die Gitarre liegt auf einer Polsterung auf und das Mikrofon wird mittig oberhalb

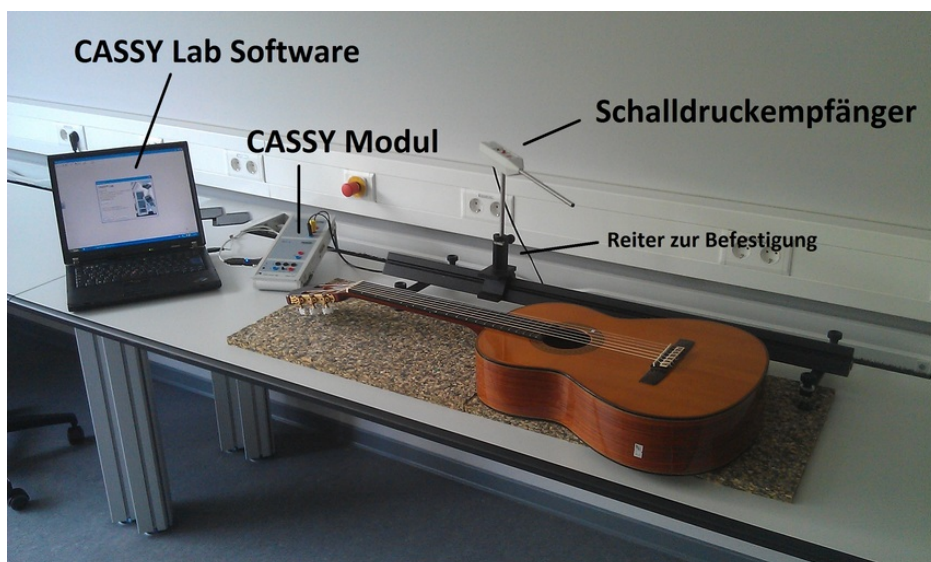


Abbildung 2.14: Messaufbau

des Schalllochs plziert. Der Einfluss des internen Rauschens der Spannung fällt dabei vernachlässigbar gering aus, allerdings liefern die Frequenzspektren einen deutlichen Peak bei 50Hz. Da dieser aber auch eine vernachlässigbare Ausprägung hat und nicht in den Bereich der später gemessenen Frequenzen fällt, bedarf dieser keiner weiteren Berücksichtigung.

2.3.4 Messung der Schwebung

Durch das Anschlagen von zwei Saiten, von denen eine leicht verstimmt ist, soll eine Schwebung erzeugt und aufgezeichnet werden. Aus dem Schwingungsverlauf soll dann die Schwebungsfrequenz bestimmt und mit den im Fourierspektrum ersichtlichen Eigenfrequenzen der beiden Saiten verglichen werden.

Dazu werden zunächst alle Saiten der Gitarre mit Hilfe des Stimmgerätes gestimmt. Das Stimmgerät erkennt automatisch, welche Saite gestimmt wird. Der Zeiger im Display muss bei allen Saiten im grünen Bereich bleiben. Um die Schwebung messen zu können, wird dann eine Saite leicht verstimmt. Hierfür eignet sich zum Beispiel die D-Saite. Dazu wird erst die Saite angeschlagen und anschließend vorsichtig an der Stimmmechanik gedreht, damit die Änderung der Tonhöhe gehört werden kann. Wird die Saite zu stark verstimmt, lassen sich keine Schwebungen erzeugen. Nun wird zum Beispiel die offene D-Saite zusammen mit der im 5. Bund gegriffenen A-Saite angeschlagen und dann die Messung gestartet. Dabei werden die beiden Saiten mit Daumen und Zeigefinger möglichst gleichzeitig angeschlagen. Die Schwebung ist sofort hörbar und umso deutlicher, je näher man sich am Schallloch befindet. Nach der Messung wird die Stimmmechanik leicht zurückgedreht und die Messung wiederholt. Die Schwebungsfrequenz sollte jetzt niedriger sein. Dies sollte sich mit dem Ohr und anhand der aufgenommenen Schwingungsbäuche bestätigen lassen. Hat man die ursprüngliche Frequenz der Saite erreicht, so sollte keine Schwebung mehr hörbar sein und die Schwingungsbäuche sollten im Spannungsbild verschwinden. Für die Messung müssen geeignete Werte für die Abtastrate und die Anzahl der Messpunkte in CASSY eingestellt werden, die sich nach dem zu vermessenden Frequenzbereich richten. Das Spannungsbild in Abb. 2.15 zeigt deutlich die Bäuche der Schwebung. Im Frequenzspektrum treten zwei Peaks auf. Es ergibt sich damit eine Schwebungsfrequenz ω_s und eine neue Frequenz ω_{res} der Schwingung. Diese ergeben sich über

$$\omega_s = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2} \quad \text{und} \quad \omega_{res} = \frac{\omega_2 + \omega_1}{2} \quad (2.12)$$

aus den ursprünglichen Frequenzen. Mit Gleichung 2.12 lassen sich daraus die Schwebungsfrequenz und die resultierende Frequenz der Gesamtbewegung berechnen.

Um die Schwebungsfrequenz f_s im Spannungsbild zu bestimmen, wird die Anzahl der Bäuche im Spannungsbild abgezählt und anschließend die gesamte Zeitdifferenz ΔT_s ermittelt. Die Zeitdifferenz kann dazu mittels CASSY Lab in den aufgenommenen Daten direkt bestimmt werden. Dabei müssen die Zeitpunkte an den Knotenpunkten abgelesen werden. Dort ist $A \approx 0$. Der exakte Knotenpunkt

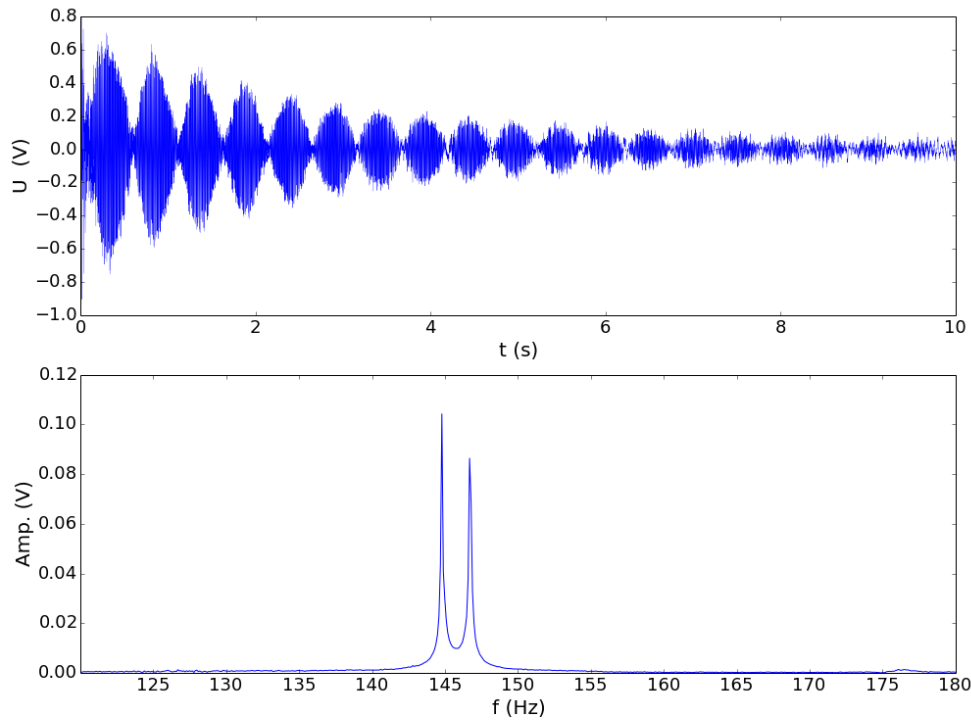


Abbildung 2.15: Messung einer Schwebung beim Stimmen der D-Saite.

liegt beim Ablesen innerhalb von zwei Schwingungsperioden der resultierenden Schwingung. Diese schwingt mit der Frequenz f_{res} .

2.3.5 Bestimmung der Saitenspannung einer Gitarrensaite

In diesem Versuch sollen die Materialeigenschaften zweier beliebiger Saiten, ausgedrückt durch das Verhältnis von Saitenspannung zu Massebelegung, ermittelt und mit den Angaben des Herstellers verglichen werden. Dazu werden zunächst die Längen der schwingenden Saiten für die entsprechenden Bünde ausgemessen. Die Messung soll mit der leer angeschlagenen Saite beginnen. Im Frequenzspektrum wird zunächst überprüft, ob die Frequenz der Leersaite mit der Erwartung übereinstimmt. Bei einer Abweichung muss die Saite zuerst nachgestimmt und die Messung wiederholt werden. Um das Auftreten von Schwebungen zu vermeiden, müssen auch die anderen Gitarrensaiten mithilfe des Stimmgeräts auf ihre Nominalfrequenz gestimmt werden. Anschließend wird für möglichst viele Bünde die Frequenz der Saite gemessen. Dieses Vorgehen wird mit einer zweiten Saite wiederholt. Für die Messung müssen geeignete Werte für die Abtastrate und die Anzahl der Messpunkte in CASSY eingestellt werden, die sich nach dem zu messenden Frequenzbereich richten.

Für die Frequenz gilt in völliger Analogie zu Gleichung (2.7):

$$f_n = \frac{n}{2L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}. \quad (2.13)$$

Dieser Ausdruck bestimmt die Schwingungsfrequenzen aller Grund- und Oberschwingungen in Abhängigkeit der Materialbeschaffenheit der Saite. Die Saite ist an beiden Enden der Saitenspannung T mit der Einheit $[T] = \text{N}$ ausgesetzt. Der Massebelag der Saite ist als μ mit der Einheit $[\mu] = \text{kg/m}$ definiert. In Gleichung (2.13) führt $n = 1$ zur Grundschwingung. Mit L ist die Länge der gegriffenen, frei schwingenden Saite bezeichnet.

Der Grundton einer Saite lässt sich also über f_1 bestimmen. Da Frequenz und Länge der Saite gemessen werden können, lässt sich eine geeignete Auftragung der Messwerte finden, so dass sich ein linearer Zusammenhang ergibt und T/μ abgelesen werden kann. Zum Vergleich wird der Wert über die vom Hersteller angegebene Saitenspannung und den Massebelag berechnet. Der Herstellerangaben zu den Eigenschaften der Saiten finden sich in Tab. 2.2.

Saite	$\mu [10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}}]$	T [N]
e'	0,3873	69,40
h	0,5234	52,62
g	0,8663	54,88
d	1,9910	70,76
A	3,4095	68,04
E	5,6712	63,50

Tabelle 2.2: Herstellerangaben der Materialeigenschaften.

2.3.6 Aufnahme eines Frequenzspektrums

In diesem Versuch soll untersucht werden, wie sich das Frequenzspektrum der Gitarre mit dem Anschlagpunkt auf der Saite verändert. Damit die Moden möglichst stark ausgeprägt sind, wird die Saite bei den folgenden Messungen senkrecht zum Steg in Schwingung versetzt. Außerdem wird die Saite mit dem Fingernagel angeschlagen, um die Auflagefläche zu minimieren. Für die Messung wird das Messintervall von $100\mu\text{s}$ ausgesucht, um Frequenzen bis 5000 Hz auflösen zu können.

In der ersten Messung wird die A-Saite in ihrer Mitte, also am 12. Bund, angeschlagen. Abb. 2.16 zeigt deutlich, dass das Frequenzspektrum in diesem Fall nur bestimmte Frequenzen enthält. Die Grundfrequenz von 110 Hz ist am deutlichsten zu erkennen. Ihre Oktave fehlt und erst die 2. Oberschwingung ist wieder zu erkennen. Da die Amplituden der Frequenzen logarithmisch abfallen, sind die Frequenzen ab 1000 Hz bei linearer Auftragung kaum noch erkennbar. Trägt man diese hingegen logarithmisch auf, so lässt sich eindrucksvoll zeigen, dass sogar bis zu einer Frequenz von 4000 Hz jede zweite Frequenz ausgeprägt ist. Der Ton

klingt demnach sehr weich und wenig lebendig.

Im Vergleich dazu wird das Frequenzspektrum der A-Saite aufgenommen, die bei einem Zehntel ihrer Länge angeschlagen wird. Auch hier ist zu erkennen, dass die Amplituden bis zur zehnten Harmonischen stetig abfallen. Die folgenden Frequenzen erscheinen allerdings ausgeprägter. Der Ton klingt hier wesentlich schärfer, dafür lebendiger. Im Protokoll sollen die Frequenzspektren für mehrere Anschlagspunkte präsentiert und qualitativ diskutiert werden.

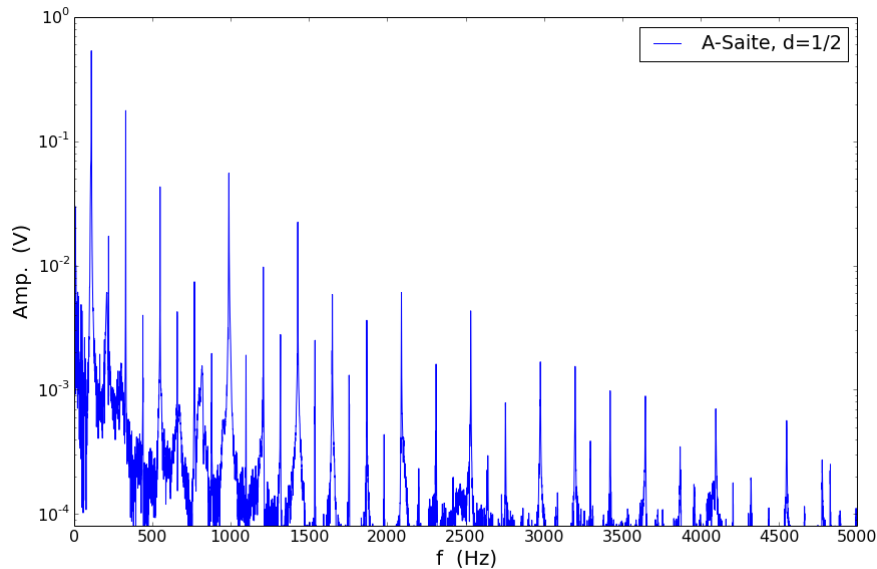


Abbildung 2.16: Frequenzspektrum der A-Saite, angeschlagen bei der Hälfte ihrer Länge.

Literaturverzeichnis

1. A. Schmitz, *Die Gitarre*, Ellert und Richter Verlag, 1998
2. Neville H. Fletcher and Thomas D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, Second Edition, Springer-Verlag New York, 2008
3. L. Bergmann und C. Schaefer, *Lehrbuch der Experimentalphysik: Mechanik - Akustik - Wärme*, Bd 1, 12. Auflage, Walter de Gruyter, 2008