

# Stehende Welle

## 1 Dünne Pfeifen

Alle Blasinstrumente erzeugen ihren Ton mit Hilfe von stehenden Wellen. Ein Blasmusiker muss nur die Luft in seinem Instrument in Schwingung bringen und die an die Umgebung abgegebene Schallenergie wieder zuführen. Bei stehenden Schallwellen muss man zwischen der Bewegung der Luft und periodischen Druckschwankungen unterscheiden. An Stellen maximaler Luftbewegung (Bewegungsbäuche) ist die Druckänderung minimal (Druckknoten), umgekehrt ist an Stellen minimaler Luftbewegung (Bewegungsknoten) die Druckänderung maximal (Druckbäuche). Ein Mikrophon oder auch unser Trommelfell reagieren auf Druckschwankungen der Luft.

### Ziel

Sie lernen, welche Frequenzen in offenen und geschlossenen Pfeifen möglich sind. Sie sehen, dass bei genauerer Betrachtung die Theorie verfeinert werden muss, um die Resultate genau zu beschreiben.

### Experiment

#### Material

Kunststoffrohr mit Gummizapfen zum Verschliessen eines Endes, Tongenerator (mit Frequenzmesser) und angeschlossener Lautsprecher, Mikrophon und angeschlossenes KO, Rollmeter

#### Durchführung

- Halten Sie die Temperatur im Praktikumszimmer im Protokoll fest. Messen Sie das Rohr aus.
- Bestimmen Sie die Positionen der Resonanzfrequenzen, indem Sie das Mikrophon ins Rohr einführen und die Frequenz am Tongenerator von 50 Hz aus erhöhen, bis die Amplitude der Schwingung maximal wird. Hinweis: Verschieben Sie das Mikrophon bei jeder neuen Frequenz an den Ort maximaler Amplitude, bevor Sie die Frequenz genau bestimmen.
- Wählen Sie eine der zuvor bestimmten Resonanzfrequenzen zwischen 1 kHz und 2 kHz. Messen Sie die Abstände der Minima (Druckknoten) vom oberen Rohrende.
- Führen Sie analoge Messungen an einem einseitig abgeschlossenen Rohr durch. Strahlen Sie dazu den Schall schräg von oben in die Öffnung ein und führen Sie das Mikrophon ebenfalls von oben axial ein. Von unten pressen Sie den Gummizapfen an die Rohröffnung, um dort einen Druckbauch (entspricht einem Bewegungsknoten) zu erzwingen.

### Auswertungen

- Theoretisch sollten alle Resonanzfrequenzen von b) ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz sein. Überprüfen Sie diese Voraussage anhand Ihrer Messwerte.
- Bestimmen Sie aus den bei c) gemessenen Abständen die Wellenlänge und daraus die Schallgeschwindigkeit.
- Der Abstand des ersten Minimums ist deutlich weniger als eine halbe Wellenlänge vom Rohrende entfernt. Wie weit ausserhalb des Rohres liegt der nächste (fiktive) Bewegungsbauch? Theoretisch sollte dieser Abstand ca. 60% vom Radius der Rohröffnung ausmachen. Können Sie die Theorie mit Ihrer Messung bestätigen? Wie gross ist die effektive Rohrlänge, die man für die Berechnung der Frequenzen verwenden sollte?

## 2 Saiten

Da die Enden einer Saite Schwingungsknoten sind, können sich auf einer Saite nur stehende Wellen mit Frequenzen ausbilden, welche diese Randbedingung respektieren.

### Ziel

Sie untersuchen die Eigenschaften stehender Wellen auf einer Saite systematisch.

### Experiment

#### Material

Schnüre, Gewichtssatz zum Spannen, Vibrationsgenerator und Tongenerator (mit Frequenzmesser), Rollmeter

#### Durchführung

- a) Messen Sie die Gesamtlänge und die Masse der verwendeten Schnur.
- b) Stellen Sie den Vibrator zunächst auf „lock“ und spannen Sie die dickere Schnur ein. Stellen Sie nun den Vibrator auf „unlock“. Zum Ein- und Ausspannen der Schnur muss der Vibrator jeweils wieder auf „lock“ eingestellt werden.
- c) Messen Sie die Länge des Schnurstücks zwischen Vibrator und Umlenkrolle (sollte ca. 120 cm betragen).
- d) Spannen Sie die Schnur durch Anhängen eines 500 g-Gewichts. Schalten Sie den Tongenerator ein und suchen Sie die Frequenz, bei welcher die Schnur erstmals stark mitschwingt (ca. 30 Hz). Tragen Sie die am Frequenzmesser abgelesene Frequenz in der Tabelle ein. Suchen Sie sukzessive weitere Resonanzfrequenzen.
- e) Führen Sie eine systematische Messreihe durch, mit der Sie die Abhängigkeit der Grundfrequenz (oder einer anderen geeigneten Oberfrequenz) von der Schnurspannung bestimmen können.

#### Auswertungen

- 1) Berechnen Sie für jede Resonanzfrequenz von d) die Wellengeschwindigkeit. Stellen Sie eine Regel für das Verhältnis der Obertonfrequenzen zur Grundfrequenz auf.
- 2) Führen Sie eine graphische Auswertung der Daten von Messung e) durch und bestimmen Sie mit einer Regressionsrechnung, wie die Grundfrequenz von der Saitenspannung abhängt.
- 3) Berechnen Sie mit der Formel für die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Transversalwellen auf einer Saite die theoretischen Werte für die untersuchten Schnüre. Vergleichen Sie diese Werte mit Ihren Messwerten.

## Bedingungen

Falls Sie zu diesem Praktikum einen Bericht schreiben, werten Sie beide Versuche vollständig aus. Für eine Auswertung ohne Bericht bearbeiten Sie mindestens die Aufgaben 1) und 2) vom Versuch 1 und Aufgaben 1) bis 3) vom Versuch 2 (ohne Fehlerrechnung).

Abgabetermin ist:

### 3 Zusätzlicher Versuch: Fourier

Nach dem Satz von Fourier kann jede periodische Funktion als Summe harmonischer Funktionen dargestellt werden, wobei alle Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz sind (Fourierreihe):

$$y(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sin(2\pi \cdot k \cdot f \cdot t + \varphi_k)$$

Dabei ist die Grundfrequenz  $f$  der Kehrwert der Periode  $T$  der betreffenden Funktion. Die einzelnen Summanden nennt man Harmonische oder Partialtöne der Funktion.

#### Ziel

Sie untersuchen einen mathematischen Zusammenhang anhand eines Computerprogramms. Gleichzeitig erfahren Sie, wie sich Änderungen in der Zusammensetzung der Obertöne auf den Klangeindruck auswirken.

#### Experiment

##### Material

Notebook mit Programm "Overtone", Kopfhörer

##### Durchführung

- Starten Sie das Programm „Overtone“. Im Programmfenster sehen Sie fünf Fenster: Das Hauptfenster enthält Kontrollelemente für zehn Frequenzgeneratoren (Module). Die Frequenzen entsprechen ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz (erstes Modul). Im *Synthesizer Control Panel* kann die Grundfrequenz eingestellt werden. Hier kann man auch den Ton ein- und ausschalten. Im Fenster *Module's Output* können die Beiträge der einzelnen Module betrachtet werden. Im Fenster *Sum Output* wird die Summe aller Signale dargestellt. Im Fenster *Spectrum* ist die Amplitude der einzelnen Module erkennbar.
- Stellen Sie die Amplitude der ersten beiden Module je auf 50% und schalten Sie diese ein. Verändern Sie die Phase des zweiten Oszillators und beobachten Sie das Resultat im Fenster *Sum Output*. Schalten Sie den Ton ein und wiederholen Sie die Phasenänderung. Halten Sie Ihre Klangwahrnehmung auf dem Resultatblatt fest. Führen Sie denselben Versuch auch mit den Modulen zwei und drei (Quinte) durch.
- Wählen Sie im Menü *Function* die Funktion *Equal Harmonics* aus, und stellen Sie die Grundfrequenz auf 200 Hz ein. Schalten Sie der Reihe nach je zwei benachbarte Module ein und benennen Sie die gehörten Intervalle. Versuchen Sie jeweils, den höheren Ton vor dem Einschalten zu summen. Wiederholen Sie die Untersuchung für eine Grundfrequenz von 300 Hz.
- Wählen Sie im Menü *Function* die Funktion *Square* aus. Notieren Sie die Amplituden der verwendeten Module. Schalten Sie ein Modul nach dem anderen ein und beobachten Sie, wie das Rechteck sukzessive nach und nach Form annimmt. Achten Sie gleichzeitig darauf, wie sich die Klangfarbe ändert und wie der neu dazugekommene Oberton erst nach einer kurzen Zeit mit den andern zu einem einheitlichen Klang verschmilzt. Verändern Sie die Grundfrequenz. Verändert sich dabei die Klangfarbe? Führen Sie die Untersuchung eventuell noch mit anderen Wellenformen durch.

#### Auswertungen

- Wie sind die bei Messung c) gehörten Intervalle definiert? Welche Module bilden Oktaven zur Grundfrequenz? Wie viele Oktaven umfassen die zehn Module?
- Stellen Sie eine Vermutung auf, wie die Amplituden der verschiedenen Harmonischen eines Rechtecks berechnet werden können. Schreiben Sie eine Formel für die Fourierreihe eines Rechtecks auf. Geben Sie die ersten Glieder der Reihe in den Taschenrechner ein und überzeugen Sie sich davon, dass Sie den gleichen Graphen wie auf dem Computer erhalten.