

Stehende Wellen

1. Schlanke Pfeifen

Blasinstrumente erzeugen ihren Klang mit Hilfe von stehenden Wellen. Ein Musiker 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 Mikrofon oder auch unser Trommelfell reagieren auf Druckschwankungen der Luft.

Ziel: Sie lernen, welche Frequenzen in offenen (ev. auch gedackten) Pfeifen möglich sind. Sie sehen, dass bei genauerer Betrachtung die Theorie verfeinert werden muss.

Material:

- Kunststoffrohr mit Gummizapfen zum Verschliessen eines Endes
- Tongenerator (mit Frequenzmesser) und angeschlossener Lautsprecher
- Mikrofon und angeschlossener Oszillograph
- Rollmeter

Messung:

- a Messen Sie das beidseits offene Rohr aus. Notieren Sie die Zimmertemperatur.
- b Bestimmen Sie die Resonanzfrequenzen, indem Sie das Mikrofon ins Rohr einführen und die Frequenz am Tongenerator von 50 Hz ausgehend erhöhen, bis die Amplitude der Schwingung maximal wird.
Hinweis: Verschieben Sie das Mikrofon bei jeder neuen Frequenz an den Ort maximaler Amplitude, bevor Sie die Frequenz genau bestimmen.
- c Wählen Sie eine der zuvor bestimmten Resonanzfrequenzen zwischen 1 kHz und 2 kHz. Messen Sie die Abstände der Minima (Druckknoten) vom oberen Rohrende aus.
- d Falls noch Zeit bleibt: Führen Sie analoge Messungen an einem einseitig geschlossenen (gedackten) Rohr durch. Strahlen Sie dazu den Schall schräg von oben in die Öffnung ein und führen Sie das Mikrofon ebenfalls von oben axial ein. Von unten pressen Sie den Gummizapfen an die Rohröffnung, um dort einen Druckbauch (entspricht einem Bewegungsknoten) zu erzwingen.

Auswertung:

1. Theoretisch sollten alle Resonanzfrequenzen von b ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz sein. Überprüfen Sie diese Voraussage anhand Ihrer Messwerte.
2. Bestimmen Sie aus den bei c gemessenen Abständen die Wellenlänge und daraus die Schallgeschwindigkeit.
3. 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.

Material:

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

Messung:

- 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 auf dem Resultatblatt 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.

Auswertung:

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.

$$c = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad \text{mit Spannkraft } F \text{ und Massenbelegung } \mu \text{ (Einheit kg/m)}$$

3. Fouriersynthese

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

$$y(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \hat{y}_k \cos(k \cdot \omega \cdot t + \varphi_k) \quad \text{mit Grundfrequenz } f = \frac{1}{T} = \frac{2\pi}{\omega}$$

Die Grundfrequenz f ist der Kehrwert der Periode T der betreffenden Funktion $y(t)$. 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.

Material: ▪ Computer mit Programm „Synthesizer.jar“, Kopfhörer

Vorgehen:

- Starten Sie das Programm und probieren Sie es aus.
- Stellen Sie eine Dreieckschwingung ein. Verstellen Sie die Phasen der Obertöne. Können Sie einen Unterschied hören?
- Wählen Sie Grundfrequenz 200 Hz und alle harmonischen Obertöne. Setzen Sie der Reihe nach bei zwei benachbarten Partialtönen die Amplitude auf Eins und alle anderen auf Null. 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 die Rechteckschwingung. Notieren Sie die Amplituden der Teiltöne. Setzen Sie - bei der höchsten Frequenz beginnend - eine nach der anderen Amplitude auf Null und beobachten Sie, wie sich das Rechteck sukzessive verändert. Achten Sie gleichzeitig darauf, wie sich die Klangfarbe ändert. Verändern Sie die Grundfrequenz. Verändert sich dabei die Klangfarbe? Führen Sie die Untersuchung eventuell noch mit anderen Wellenformen durch.

Aufgaben:

- Wie sind die bei Messung c gehörten Intervalle definiert?
- 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.

Auswertung: Die Auswertung oder der Bericht muss nur die Abschnitte 1 und 2 ausführlich behandeln. Bei Abschnitt 3 sollen Sie lediglich Ihre Beobachtungen kurz zusammenfassen.