

Doppler - Effekt (ArtikelNr.: P6012100)

Curriculare Themenzuordnung



Schwierigkeitsgrad



Leicht

Vorbereitungszeit



10 Minuten

Durchführungszeit



10 Minuten

empfohlene Gruppengröße



1 Schüler/Student

Zusätzlich wird benötigt:

- Mikrofon
- PC

Versuchsvarianten:

Schlagwörter:

Aufgabe und Material

Lehrerinformationen

Zusätzliche Informationen

In dieser Variante kann man sich beim Fourier-Spektrum (Amplitude gegen Frequenz) die minimale und maximale Frequenz innerhalb eines wählbaren Intervalls anzeigen lassen. Die Veränderung der aufgezeichneten Frequenz aufgrund des Dopplereffektes ist durch das Wandern des Peaks anschaulich sichtbar. Alternativ kann die Variante 3.7b gewählt werden. Im Einstiegsexperiment wird der aus dem Alltag bekannte Doppler-Effekt bei einer hörbaren Frequenz qualitativ ins Gedächtnis gerufen. Im Hauptexperiment wird der Fall einer harmonisch schwingenden Schallquelle untersucht. Zunächst wird die Frequenz des ausgesandten Signals in Ruhe gemessen. Daraufhin wird die Frequenzverschiebung beim schwingenden Doppler-Sender mit der Software nachgewiesen. Schließlich wird die Geschwindigkeit, mit der sich die Schallquelle bewegt, aus den experimentell ermittelten Werten berechnet und mit dem theoretischen Wert verglichen. Die Eleganz der Vorgehensweise besteht darin, ein berührungsloses Verfahren zur Geschwindigkeitsbestimmung zu haben ohne Kenntnis der Frequenz des ausgesandten Signals. In der Medizin erfolgt mit Hilfe des Doppler-Effektes beispielsweise die Messung der Blutstromgeschwindigkeit mit Ultraschall von außen durch das Gewebe des Patienten.

Hinweise zur Durchführung

Der Versuch sollte von zwei Schülern durchgeführt werden.

Teil 1: Frequenzverschiebung im hörbaren Bereich durch schnelle Bewegung des Doppler-Senders

Der Effekt wird oft deutlicher wahrgenommen, wenn der Versuch von zwei Personen durchgeführt wird.

Teil 2: Bestimmung der Frequenzverschiebung des Signals mit Hilfe der Software

Die Frequenz des Doppler-Senders von 19 kHz wurde so hoch gewählt, weil - sich damit die maximale Frequenzauflösung erreichen lässt, - diese Tonhöhe für Menschen nicht mehr hörbar und damit auch nicht belästigend ist und - von Standard-Soundadaptern noch zuverlässig verarbeitet wird. Der Doppler-Sender enthält eine Regelung zur Stabilisierung der Frequenz. Wird ein starkes Absinken der Frequenz beobachtet (mehr als 10 Hz in 3 Minuten), bedeutet dies, dass die für die Regelung erforderliche Batteriespannung von 6 V unterschritten wird. Die Batterie muss dann ausgetauscht werden. Der Wert für die Senderfrequenz liegt wegen der Toleranz der elektronischen Bauteile im Bereich 19 kHz \pm 10 %. Die in der Tabelle angegebenen Werte sind daher nur Beispielmessungen.

Herleitung der Formel $f' = f_0 \frac{c}{c-v}$ (bewegte Schallquelle, ruhender Beobachter)

d Abstand Schallquelle - Beobachter zu Beginn

$T = \frac{1}{f}$ Dauer einer Schwingung

Es werden nun die folgenden 4 Zeitpunkte betrachtet:

$t_0 = 0$	Schallquelle beginnt mit der Aussendung des ersten Wellenberges.
$t_1 = t_0 + \frac{d}{c}$	Beobachter nimmt Welle 1 wahr.
$t_2 = t_0 + T$	Schallsender beginnt mit der Aussendung des zweiten Wellenberges. Er hat sich in dieser Zeit um die Strecke $\Delta s = v \cdot T$ weiterbewegt. Dadurch hat sich der Abstand zwischen Sender und Empfänger auf $d - \Delta s$ verringert.
$t_3 = t_2 + \frac{d - \Delta s}{c}$	Beobachter nimmt Welle 2 wahr.

Der Beobachter nimmt also eine Welle mit der Periodendauer $T' = t_3 - t_1$ wahr.

$$t_3 - t_1 = \left(t_2 + \frac{d - \Delta s}{c} \right) - \left(t_0 + \frac{d}{c} \right) = t_0 + T + \frac{d - vT}{c} - t_0 - \frac{d}{c} = T - \frac{vT}{c} = T \cdot \left(1 - \frac{v}{c} \right)$$

Wenn die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Wellen $T' = T \cdot \left(1 - \frac{v}{c} \right)$, beträgt, dann entspricht dies einer Frequenz $f' = \frac{1}{T'} = \frac{1}{T \cdot \left(1 - \frac{v}{c} \right)} = f_0 \frac{1}{1 - \frac{v}{c}} = f_0 \frac{c}{c - v}$. Entsprechend ergibt sich die Formel für ruhende Schallquelle und bewegten

Beobachter sowie für den Fall, dass sich beide bewegen.

Herleitung der Formel $v = \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} c$

Die Frequenz des Fahrgeräuschs des Wagens beträgt $f_1 = f_0 \frac{c}{c - v}$ wenn er sich dem Beobachter nähert und $f_2 = f_0 \frac{c}{c + v}$ wenn er sich vom Beobachter entfernt. Dividiert man die beiden Brüche folgt

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{c + v}{c - v} \Leftrightarrow (c - v)f_1 = (c + v)f_2 \Leftrightarrow v = \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} c = \left(\frac{\frac{f_1}{f_2} - 1}{\frac{f_1}{f_2} + 1} \right) c$$

Im rechten Teil der letzten Zeile reicht die Kenntnis des Intervalls, um die Geschwindigkeit zu bestimmen. Die Frequenzen selber müssen nicht bekannt sein. Die beiden Töne einer Quinte beispielsweise stehen im Verhältnis 4:3, unabhängig von der Frequenz des ausgesandten (ursprünglichen) Signals. Hieraus ergibt sich die Geschwindigkeit $v \approx 49 \text{ m/s} \approx 176 \text{ km/h}$.

Aufgabe

Warum werden die Töne des Martinshorns tiefer, wenn ein Krankenwagen vorbeifährt?

Fährt ein Krankenwagen vorbei, wird das wahrgenommene (gemessene) Signal des Martinshorns tiefer. Das bedeutet, dass die Frequenzen der wahrgenommenen Töne kleiner werden. Diese Veränderung der wahrgenommenen Frequenz von Wellen jeder Art, während sich die Quelle und der Beobachter relativ zueinander bewegen, wird Doppler-Effekt genannt. Technische Anwendung findet der Doppler-Effekt zum Beispiel bei Radarfallen im Straßenverkehr oder der Bestimmung der Geschwindigkeit, mit der sich das Universum ausbreitet (optischer Dopplereffekt).

1. Bewege den Doppler-Sender, wenn er einen Ton von 4,6 kHz aussendet, sehr schnell hin und her und beschreibe, was du hörst.
2. Bestimme mit Hilfe des Doppler-Effekts die Geschwindigkeit eines schwingenden Federpendels:
 - Lass den Doppler-Sender mit dem 19 kHz-Signal an einer Feder über einem Mikrofon harmo-nisch schwingen.
 - Analysiere das vom Mikrofon registrierte Signal am Computer. Beobachte den Doppler-Effekt und bestimme die maximale Geschwindigkeit des Pendels.



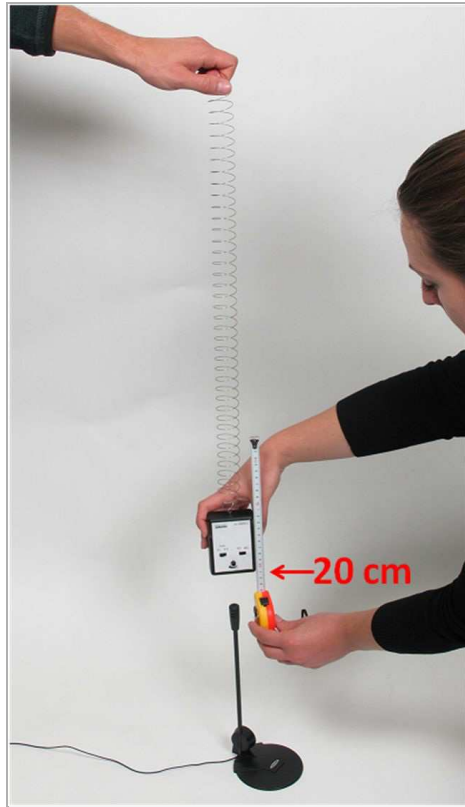
Material

Position	Material	Bestellnr.	Menge
1	Software "measure Acoustics"	14441-61	1
2	Dopplersender für TESS Akustik	13289-30	1
3	Schraubenfeder, 3 N/m	02220-00	1
4	Maßband, l = 2 m	09936-00	1
Zusätzlich wird benötigt:			
	Mikrofon		1


Aufbau und Durchführung

Teil 1: Frequenzverschiebung im hörbaren Bereich durch schnelle Bewegung des Doppler-Senders


- Wählt die Frequenz 4,6 kHz. Bewegt den Doppler-Sender mehrere Male hintereinander schnell vom Ohr oder Gesicht (oder dem Ohr oder Gesicht eines Mitschülers) weg und wie-der zurück. Notiert, wie ihr die Frequenz des Signals wahr-nehmt (unter Beobachtungen und Ergebnisse, Teil 1).



Teil 2: Bestimmung der Frequenzverschiebung des 19 kHz-Signals mit Hilfe der Software

- Schließt das Mikrofon korrekt an den Computer an.
- Öffnet die Audio-Einstellungen des PCs. Stellt die Aufnahme-lautstärke des Mikrofons auf das Maximum. Startet die Software measure Acoustics. 
- Öffnet das Experiment „3.7a Doppler-Effekt“.

Hilfe 1:


Öffne die Experimentübersicht (Menüpunkt „Datei“ → „Experiment öffnen“ oder in der Menüleiste  „Experiment öffnen“ auswählen). Wähle aus dem Ordner „3 Anwendungen aus Medizin, Musik und Alltag“ das Experiment „3.7a Doppler-Effekt, Variante 1“.

- Wählt an dem Doppler-Sender die Frequenz 19 kHz und schaltet ihn ein.
- Notiert den ungefähren Wert des Maximums der Frequenz des ausgesandten Signals (unter Beobachtungen und Ergebnisse, Teil 2, 2.).

Hilfe 2:

Wähle im entsprechenden Diagrammfenster  „Zoom“ aus. Halte die linke Maustaste gedrückt und ziehe um den geeigneten Diagrammausschnitt zum Vergrößern ein Rechteck von der oberen linken Ecke hin zur unteren rechten Ecke.

Hilfe 3:

Verwende im Diagrammfenster oben in der grauen Leiste das Fadenkreuz  „Markieren“, um den x-Wert (hier: Frequenz in Hz) und den y-Wert (hier: relative Amplitude des Schalldrucks in %) an der Stelle des Fadenkreuzes zu ermitteln, indem du beide Werte am unteren Bildschirmrand in der Statusleiste abliest (Abb. 3).

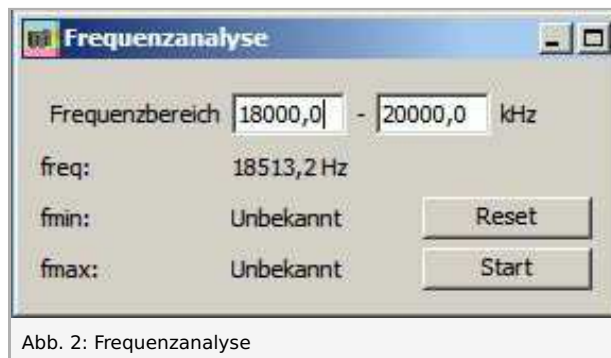


Abb. 2: Frequenzanalyse

Die Frequenz des vom Doppler-Sender ausgesandten Tons kann auch in dem Fenster „Frequenzanalyse“ abgelesen werden (freq = ... Hz) (Abb. 2).

- Stellt nun den Frequenzbereich im „Frequenzanalyse“ Fenster (Abb. 2) so ein, dass der Wert des Maximums in diesem Intervall liegt. Das Intervall sollte ca. 1000 – 2000 Hz umfassen. (Bsp.: Ihr habt festgestellt, dass das Maximum ungefähr bei 18 500 Hz liegt. Stellt die untere Schwelle auf 18 000 Hz und die obere auf 19 000 Hz ein.)
- Führt den Versuch wie in Abb.1 dargestellt aus:

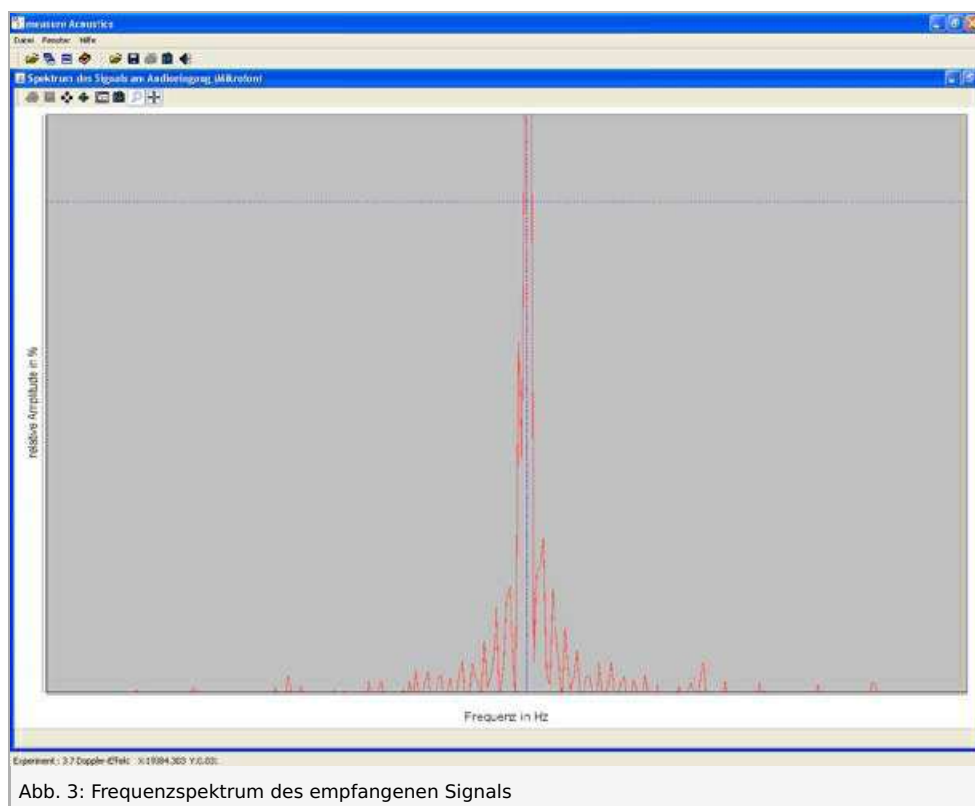


Abb. 3: Frequenzspektrum des empfangenen Signals

- Schüler 1: Halte die Feder an einem Ende fest und hänge den Doppler- Sender an das andere Ende. Die Feder dehnt sich in eine Ruheposition.
- Platziert das Mikrofon auf der Erde direkt unter den Doppler-Sender. Richtet das Mikrofon nach oben auf den Sender aus.
- Schüler 2: Halte das Maßband so, dass es ungefähr eine Verlängerung der Feder bildet. Der Nullpunkt der Skala befindet sich am unteren Ende des Doppler-Senders. Maßband und Feder sind etwas versetzt zueinander, sodass der Doppler-Sender ausgelenkt werden kann, ohne dabei an das Maßband zu stoßen.
- Aktiviert die Frequenzanalyse, indem ihr „Start“ wählt.
- Schüler 2: Ziehe den Doppler-Sender 20 cm in Richtung Boden, bzw. Mikrofon und lasse ihn los.
- Beschreibt, wie die Kurve im Diagrammfenster „Spektrum des Signals am Audioeingang (Mikrofon)“ aussieht und wie sie sich nach mehreren
- Nach einigen Schwingungen könnt ihr die Messung der Frequenz durch wählen von „Stopp“ beenden. Schwingungen verändert (unter Beobachtungen und Ergebnisse, Teil 2, 3.).
- Notiert den höchsten (f_{\max}) und den niedrigsten Wert f_{\min} der Frequenz, zu dem sich das Maximum der Kurve verschiebt (unter Beobachtungen und Ergebnisse, Teil 2, 4.).
- Beobachtet und notiert, wie dieses Maximum und das Minimum mit der Auslenkung der Feder zusammenhängen (unter Beobachtungen und Ergebnisse, Teil 2, 5.).

- Wiederholt die Messungen mehrere Male.

Protokoll: Doppler - Effekt

Ergebnis - Frage 1 (5 Punkte)

Teil 1: Frequenzverschiebung im hörbaren Bereich durch schnelle Bewegung des Doppler-Senders

Beschreibt, wie ihr den Ton während der Bewegung des Senders wahrnehmt.

.....

.....

.....

.....

Ergebnis - Frage 2 (10 Punkte)

Teil 2: Bestimmung der Frequenzverschiebung des Signals mit Hilfe der Software

- Frequenz des ausgesandten Signals in Ruhe: $f_0 =$
- Beschreibt, wie sich der größte (kleinste) Wert der Frequenz f_{max} (f_{min}), zu dem sich das Maximum verschiebt, nach mehreren Schwingungen verändert.

.....

.....

.....

.....

Ergebnis - Tabelle 1 (24 Punkte)

Notiert den größten/kleinsten Wert der Frequenz, zu dem sich das Maximum der Kurve nach Schwingungen verschiebt.

	f_{\min} in Hz		f_{\max} in Hz		$f_{\max} - f_{\min}$ in Hz		$f_{\max} + f_{\min}$ in Hz	
Messung 1	19,216	1	19,312	1	96	1	38,528	1
Messung 2	19,211	1	19,312	1	101	1	38,523	1
Messung 3	19,210	1	19,308	1	98	1	38,518	1
Messung 4	19,209	1	19,309	1	100	1	38,518	1
Messung 5	19,211	1	19,308	1	97	1	38,519	1
Mittelwert	19,211	1	19,310	1	98	1	38,521	1

Ergebnis - Frage 3 (5 Punkte)

Beschreibt, wie f_{\max} und f_{\min} mit der Auslenkung der Feder zusammenhängen. Bei welcher Auslenkung wird die Frequenz f_0 empfangen?

.....

.....

.....

.....

Auswertung - Frage 1 (10 Punkte)

Erklärt, wie die Veränderung der Kurve im Laufe der Zeit mit der Auslenkung und der Geschwindigkeit des Federpendels zusammenhängt.

.....

.....

.....

.....

Auswertung - Frage 2 (10 Punkte)

Berechnet mit Hilfe der Formel

$$v_{max} = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{max} + f_{min}} \cdot c$$

aus den gemessenen Werten für f_{max} und f_{min} die maximale Geschwindigkeit des Federpendels ($c = 343 \text{ m/s}$). Benutzt die Mittelwerte von f_{max} - f_{min} und $f_{max} + f_{min}$. Wann erreicht das Federpendel diese Geschwindigkeit?

.....

.....

.....

.....

Auswertung - Frage 3 (10 Punkte)

Berechnet den theoretisch größten Wert der Geschwindigkeit $v_{max} = s\sqrt{\frac{D}{m}}$, mit der sich das Federpendel bewegt (Federkonstante $D = 3 \text{ N/m}$, Masse $m = 0,11\text{kg}$). Vergleicht das Ergebnis mit dem experimentell ermittelten Wert aus 2.

.....

.....

.....

.....

Auswertung - Frage 4 (10 Punkte)

Erklärt anhand der Formel $f' = f_0 \frac{c}{c-v}$, warum der Doppler-Effekt nur bei großen Frequenzen oder hoher Geschwindigkeit der Schallquelle wahrnehmbar ist.

.....

.....

.....

.....

Auswertung - Frage 5 (10 Punkte)

Mit Hilfe des Doppler-Effekts kann rein akustisch die Geschwindigkeit eines vorbei fahrenden Autos berechnet werden. Diese Methode funktioniert sowohl mit dem Martinshorn eines Krankenwagens als auch mit dem Motorengeräusch eines beliebigen PKWs. Die Frequenz des Ruhesignals ist dabei nicht notwendig.

Beispiel: Das Maximum im Frequenzspektrum eines Rennwagens verschiebt sich während des Vorbeifahrens von ca. $f_1 = 960$ Hz zu ca. $f_2 = 640$ Hz. Berechnet die Geschwindigkeit, mit der der Rennwagen die Tribüne passiert.

Hinweis: Mit etwas Übung können musikalische Menschen Intervalle mit dem Gehör bestimmen. Mit der obigen Formel (so umgestellt, dass nur Brüche der Art f_1/f_2 vorkommen) können auf diese Weise ganz ohne technische Hilfsmittel und ohne Kenntnis der Frequenzen Geschwindigkeiten recht genau abgeschätzt werden. Die Tabelle zeigt einige Intervalle mit den dazu gehörigen Geschwindigkeiten.

Intervall	Frequenzverhältnis f_1/f_2	Geschwindigkeit v in m/s	Geschwindigkeit v in km/h
Prime	1:1	0	0
Kleine Sekunde	16:15	11,1	39,8
Große Sekunde	9:8	20,2	72,6
Quarte	4:3	49,0	176,4
Oktave	2:1	114,3	411,6

.....

.....

.....

.....