

IM5

Modul Mechanik

Doppler-Effekt

Der Doppler-Effekt bezeichnet die zeitliche Stauchung bzw. Dehnung eines Signals, die auftritt, wenn während der Dauer des Signals der Abstand zwischen Sender und Empfänger verändert wird. In diesem Versuch soll der akustische Doppler-Effekt anhand zweier baugleicher Ultraschallwandler, die als Sender und Empfänger fungieren, untersucht werden.

Versuch IM5 - Doppler-Effekt

Der Doppler-Effekt bezeichnet die zeitliche Stauchung bzw. Dehnung eines Signals, die auftritt, wenn während der Dauer des Signals der Abstand zwischen Sender und Empfänger verändert wird. In diesem Versuch soll der akustische Doppler-Effekt anhand zweier baugleicher Ultraschallwandler, die als Sender und Empfänger fungieren, untersucht werden.

1.1 Fragen zur Vorbereitung

- Nenne einige Anwendungsbereiche, bei denen der Doppler-Effekt von Nutzen sein kann
- Wie kann man den Doppler-Effekt erklären?
- Woher kommt die Bezeichnung RADAR und wie funktioniert er?
- Wie funktioniert ein Ultraschallwandler?
- Was ist Schall?
- Wie gross ist die Schallgeschwindigkeit? Welcher Zusammenhang besteht zwischen ihr, der Frequenz ν und der Wellenlänge λ ?
- Was ist Licht?
- Was ist Ultraschall?

1.2 Theorie

1.2.1 Der akustische Doppler-Effekt

Dem Phänomen des akustischen Doppler-Effekts begegnen wir häufig im Alltag. Das bekannteste Beispiel ist das Martinshorn eines Rettungsfahrzeugs, das höher klingt, wenn sich das Fahrzeug dem Beobachter nähert. Es klingt tiefer, wenn sich das Fahrzeug vom Beobachter entfernt. Fährt das Fahrzeug am Beobachter vorbei, schlägt die Tonhöhe im Augenblick des Vorbeifahrens um. Ebenso verhält sich die Tonhöhe, wenn sich der Beobachter relativ zur ruhenden Schallquelle bewegt.

Obwohl im Folgenden nur der akustische Doppler-Effekt behandelt wird, ist die Theorie analog im Allgemeinen auf beliebige Wellenerzeuger anwendbar. Da sich Schallwellen, im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen, nur in einem Medium ausbreiten können, tritt der akustische Doppler-Effekt im Vakuum nicht auf. Im Vakuum ist dagegen der relativistische Doppler-Effekt zu beobachten, der darauf zurückzuführen ist, dass sich die elektromagnetischen Wellen mit endlicher Geschwindigkeit, der Lichtgeschwindigkeit, ausbreiten.

Betrachten wir nun zunächst den Fall, dass Schallquelle A und Beobachter B relativ zum Ausbreitungsmedium ruhen (Fig. 1.1) Die von der Schallquelle A ausgehenden Wellenfronten

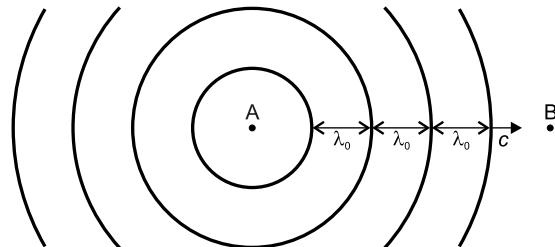


Abbildung 1.1: Schallausbreitung bei ruhender Schallquelle und ruhendem Beobachter.

haben alle den Abstand λ_0 und nähern sich mit der Schallgeschwindigkeit

$$c = \lambda_0 \nu_0$$

dem Beobachter B , bis sie nach der Zeit

$$t_0 = \frac{1}{f_0}$$

den Beobachter erreichen. Bewegt sich nun die Schallquelle A mit der Geschwindigkeit v auf den relativ zum Ausbreitungsmedium ruhenden Beobachter B (Fig. 1.2),

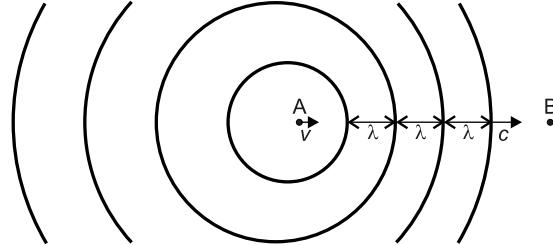


Abbildung 1.2: Schallausbreitung bei bewegter Schallquelle und ruhendem Beobachter.

so legt die Schallquelle während einer Schwingungsperiode t_0 die Strecke

$$s = v \cdot t_0$$

zurück. Somit ist der Abstand zwischen der vorhergehenden und der gerade neu entstehenden Wellenfront um $v \cdot t_0$ kleiner als bisher, nämlich

$$\lambda = \lambda_0 - v \cdot t_0$$

Die Wellenfronten breiten sich mit der Geschwindigkeit c aus und erreichen den Beobachter nach der Zeit

$$t = \frac{\lambda}{c} = t_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

Der ruhende Beobachter B hört die sich bewegende Schallquelle folglich mit der Frequenz

$$\nu = \frac{1}{t} = \frac{\nu_0}{1 - \frac{v}{c}} \quad (1.1)$$

Bewegt sich nun nicht die Schallquelle, sondern der Beobachter mit der Geschwindigkeit v auf eine relativ zum Ausbreitungsmedium ruhende Schallquelle zu (Fig. 1.3),

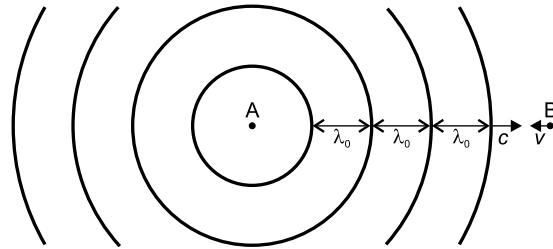


Abbildung 1.3: Schallausbreitung bei ruhender Schallquelle und bewegtem Beobachter.

so beträgt der Abstand zwischen den Wellenfronten wieder den ursprünglichen Wert λ_0 . Diese breiten sich dann im Medium mit der Geschwindigkeit c aus und erreichen nun den Beobachter jedoch bereits im Zeitabstand

$$t = \frac{\lambda_0}{c + v} = \frac{t_0}{1 + \frac{v}{c}}$$

Daher hört der sich bewegende Beobachter die ruhende Schallquelle mit der Frequenz

$$\nu = \frac{1}{t} = \nu_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right) \quad (1.2)$$

Gleichungen (1.1) und (1.2) liefern für grosse Geschwindigkeiten v unterschiedliche Ergebnisse, der Unterschied kann jedoch bei kleinen Geschwindigkeiten vernachlässigt werden. Die Frequenzänderung

$$\Delta\nu = \nu - \nu_0 = \nu_0 \frac{v}{c}$$

ist dann proportional zur Geschwindigkeit v . Gleichungen (1.1) und (1.2) lassen sich auch zu einer Gleichung kombinieren, welche die für den Beobachter wahrgenommene Frequenz ν_B beschreibt, wenn der Sender *und* der Empfänger mit der zum Medium relativen Geschwindigkeit v_S , resp. v_B , in Bewegung sind.

- Sender und Empfänger bewegen sich aufeinander zu:

$$\nu_B = \nu_S \frac{c + v_B}{c - v_S} \quad (1.3)$$

- Sender und Empfänger bewegen sich voneinander weg:

$$\nu_B = \nu_S \frac{c - v_B}{c + v_S} \quad (1.4)$$

Mit Gleichungen (1.3) und (1.4) lässt sich nun auch eine ganz allgemeine Form der vom Beobachter wahrgenommenen Frequenz formulieren:

$$\nu_B = \nu_S \left(\frac{c \pm v_B}{c \mp v_S} \right) \quad (1.5)$$

wobei das obere(untere) Operationszeichen gilt, wenn sich Beobachter und Sender nähern (entfernen).

1.3 Experiment

1.3.1 Versuchszubehör

Komponente	Anzahl
Ultraschallwandler 40Hz	2
Generator 40Hz	1
AC-Verstärker	1
Messwagen mit Elektroantrieb	1
Präzisions-Metallschiene 1m	2
Schienenverbinder	1
Schienenfüsse	2
Digitalzähler	1
Zweikanal-Oszilloskop	1
Handstoppuhren	1
Sockel	2
Stativstange 25cm	1
Stativstange 47cm	1
Muffe mit Ring	1
Verbindungskabel abgeschirmt	1
Kupplungen	6
Messkabel BNC/4mm	1
Experimentierkabel	4

1.3.2 Versuchsaufbau und Justage

Grundlegender Aufbau

- Ultraschallwandler (*c*) mit Klettverschluss in Längsrichtung auf dem Messwagen mit Elektroantrieb fixieren und Messwagen auf die Metallschiene setzen.
- Abgeschirmtes Verbindungskabel über Kupplungsstecker an Kabelpaar des Ultraschallwandlers anschliessen, in passender Länge auslegen, durch den Ring (*d*) schleifen und freies Ende an Ausgang (*e*) des Generators anschliessen.
- Ultraschallwandler (*f*) an Eingang des AC-Verstärkers anschliessen und so ausrichten, dass sich beide Ultraschallwandler in gleicher Höhe gegenüberstehen.

Einstellung der Resonanzfrequenz

- Generator auf kontinuierlichen Betrieb stellen und AC-Verstärker auf "~~" stellen.
- Beide einschalten und 15 Minuten warten, bis ein stabiler Betriebszustand erreicht ist.
- Ausgangssignal des AC-Verstärkers bei mittlerer Verstärkung über BNC-Messkabel in Oszilloskop einspeisen (siehe Abb. 1.4).
- Ausgangssignal mit dem Oszilloskop beobachten und Ausrichtung der beiden Ultraschallwandler verbessern.
- Frequenz am Generator so verstetzen, dass das Ausgangssignal maximale Amplitude hat (Resonanzfrequenz).
- Mit der Verstärkung des AC-Verstärkers die Amplitude des Ausgangssignals bei maximaler Entfernung des Messwagens z.B. auf etwa 0.7V einstellen.

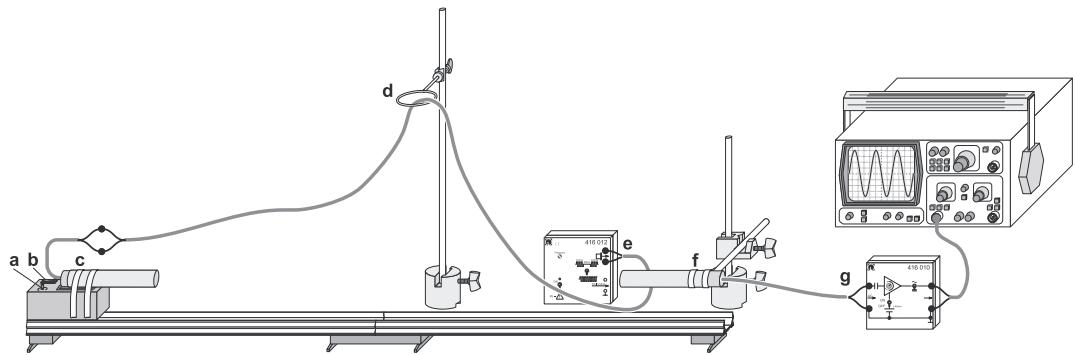


Abbildung 1.4: Aufbau zur Einstellung der Resonanzfrequenz

Messung der Frequenz des Ultraschallwandlers

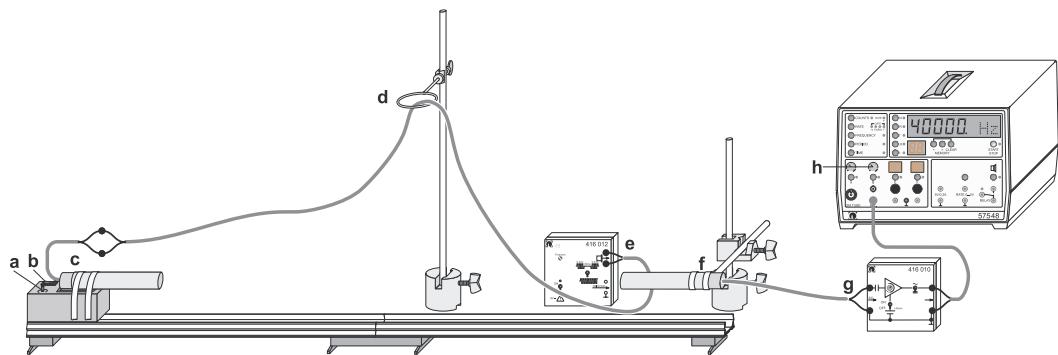


Abbildung 1.5: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Doppler-Effekts bei bewegter Schallquelle

- Digitalzähler einschalten, Ausgangssignal des AC-Verstärkers über BNC-Messkabel in Eingang B einspeisen (siehe Abb. 1.5) und Taste B drücken.
- Taste *Frequency* drücken und Einheit Hz wählen.
- Eingangsschwelle an Eingang B mit Drehpotentiometer (*h*) auf 0.7V stellen.

Durchführung

- Geschwindigkeit v des Messwagens mit Potentiometer (*a*) einstellen.
- Antriebsmotor mit Dreistufenschalter (*b*) einschalten, Messwagen zur Bestimmung der Geschwindigkeit z.B. Messstrecke $\Delta s = 1m$ fahren lassen und mit der im Zählgerät integrierten Stoppuhr dreimal die benötigte Zeit Δt messen und notieren.
- Antriebsmotor mit Dreistufenschalter ausschalten, mit Taste START/STOP des Digitalzählers Messung der Frequenz ν_0 starten und nach etwa 1s durch erneuten Tastendruck beenden.
- Dreistufenschalter betätigen, Messwagen mit zuvor bestimmter Geschwindigkeit nach "rechts" fahren lassen und mit Taste START/STOP des Digitalzählers Messung der Frequenz ν starten und nach etwa einer Sekunde durch erneuten Tastendruck beenden.

- Antriebsmotor mit Dreistufenschalter ausschalten und Ruhefrequenz v_0 erneut bestimmen.
- Dreistufenschalter betätigen, Messwagen mit gleicher Geschwindigkeit nach "links" fahren lassen und Frequenz v messen und notieren.
- Messwagen noch dreimal nach "rechts" und anschliessen nach "links" fahren lassen und Frequenzmessung wiederholen.
- Kleinere Geschwindigkeit des Messwagens einstellen, zunächst die Geschwindigkeit v messen und anschliessend die Frequenzmessungen für nach "rechts" und nach "links" fahrenden Messwagen durchführen.
- Messungen für insgesamt fünf weitere Geschwindigkeiten v wiederholen.
- Wiederhole dieselbe Messung mit ruhendem Sender und bewegtem Empfänger, indem der Ultraschallwandler auf dem Messwagen über das Verbindungskabel an den Eingang des AC-Verstärkers und der feststehende Ultraschallwandler an den Ausgang des Generators angeschlossen wird.

1.3.3 Aufgaben zur Auswertung

- Bestimme für jede Messreihe und beide Richtungen den Mittelwert, die Standardabweichung und die Standardabweichung des Mittelwertes der Geschwindigkeit und der verschobenen Frequenz v .
- Trage in einem Diagramm die Frequenzänderung Δv gegen die Geschwindigkeit v des Messwagens auf.
- Überprüfe für beide Versuche die Relation zwischen Frequenzänderung und Geschwindigkeit.
- Wie hängt die Frequenzänderung Δv von der Geschwindigkeit des Senders ab?
- Bestimme aus dem Diagramm den Wert für die Schallgeschwindigkeit und vergleiche ihn mit dem Literaturwert bei der zugehörigen Umgebungstemperatur.

1.4 Literatur

- D. Meschede, "Gerthsen Physik", Springer Verlag