

Untersuchung des *Doppler*-Effekts mit Ultraschallwellen

Versuchsziele

- Messung der Frequenzänderung für den ruhenden Beobachter in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit v Ultraschallquelle.
- Bestätigung der Proportionalität zwischen der Frequenzänderung Δf und der Geschwindigkeit v der Ultraschallquelle.
- Bestimmung der Schallgeschwindigkeit c in Luft.

Grundlagen

Der akustische Doppler-Effekt kann im Alltag häufig beobachtet werden. Z. B. klingt das Martinshorn eines Rettungsfahrzeugs höher, während das Fahrzeug auf den Beobachter zu fährt, und tiefer, während sich das Fahrzeug entfernt. Die Tonhöhe schlägt in Augenblick des Vorbeifahrens um. Auch wenn sich der Beobachter relativ zur ruhenden Schallquelle bewegt, hört er ein frequenzverschobenes Signal.

Zur Erklärung betrachte man zunächst den Fall, dass Schallquelle A und Beobachter B relativ zum Ausbreitungsmedium ruhen (siehe Fig. 1). Die von einer Schallquelle der Frequenz f_0 ausgehenden Wellenfronten haben den Abstand λ_0 . Sie bewegen sich mit der Schallgeschwindigkeit

$$c = f_0 \cdot \lambda_0 \quad (I)$$

auf den Beobachter zu und erreichen ihn im Zeitabstand

$$T_0 = \frac{1}{f_0} \quad (II).$$

Die Situation ändert sich, wenn sich die Schallquelle mit der Geschwindigkeit v auf den relativ zum Ausbreitungsmedium ruhenden Beobachter zu bewegt. Während einer Schwingungsperiode T_0 legt die Schallquelle die Strecke

$$s = v \cdot T_0 \quad (III)$$

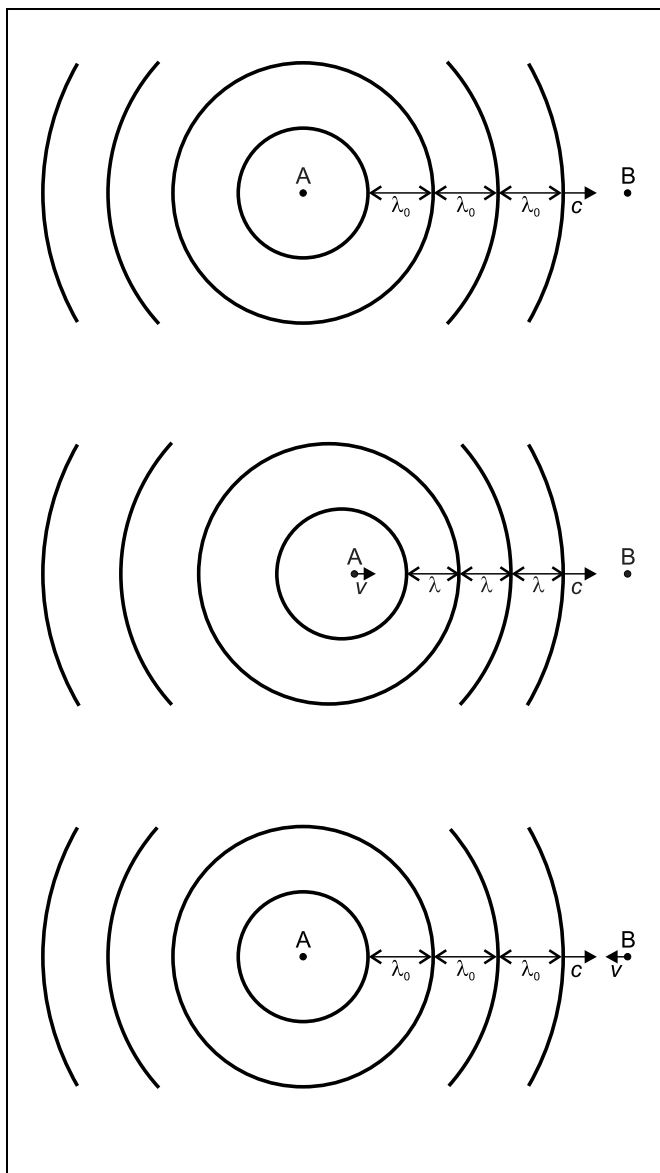
zurück; daher beträgt der Abstand zwischen der vorhergehenden und der gerade entstehenden Wellenfront

$$\lambda = \lambda_0 - v \cdot T_0 \quad (IV).$$

Die Wellenfronten breiten sich mit der Geschwindigkeit c aus und erreichen den Beobachter im Zeitabstand

$$T = \frac{\lambda}{c} = T_0 \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right) \quad (V).$$

Fig. 1 Schallausbreitung bei ruhender Schallquelle und ruhendem Beobachter (oben), bewegter Schallquelle (Mitte) und bewegtem Beobachter (unten)



Geräte

2 Ultraschallwandler, 40 kHz	416 000
1 Generator 40 kHz	416 012
1 AC-Verstärker	416 010
1 Messwagen mit Elektroantrieb	337 07
2 Batterie 1,5 V Mignon	200 66 264
2 Präzisions-Metallschienen, 1 m	460 81
1 Schienenverbinder	460 85
1 Satz 2 Schienenfüße	460 88
1 Digitalzähler	575 48
1 Zweikanal-Oszilloskop 303	575 211
1 Handstoppuhr 1,30s/15 min	313 07
2 Sockel	300 11
1 Stativstange, 25 cm	30041
1 Stativstange, 47 cm	300 42
1 Leybold-Muffe	301 01
1 Muffe mit Ring	301 10
1 Verbindungskabel abgeschirmt	501 031
1 Satz 6 Kupplungen, schwarz	501 644
1 Messkabel BNC/4 mm	575 24
Experimentierkabel	

Elektroantrieb befestigt, der zweite an einer Stativstange fixiert. Die Frequenz des Beobachtersignals wird mit einem hochauflösenden Digitalzähler gemessen. Zur Bestimmung der Geschwindigkeit

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (X)$$

des bewegten Ultraschallwandlers wird mit einer Stoppuhr die Zeit Δt gemessen, die der Messwagen für eine vorgegebene Strecke Δs benötigt.

Aufbau

Der Versuchsaufbau ist in Fig. 2 und 3 dargestellt.

Grundlegender Aufbau:

- Präzisions-Metallschienen mit Schienenverbinder aneinander koppeln und an den beiden Enden mit Schienenfüßen abstützen.
- Ultraschallwandler **(c)** mit Klebeband in Längsrichtung auf Messwagen mit Elektroantrieb fixieren und Messwagen auf Präzisions-Metallschiene setzen.
- Muffe mit Ring **(d)** an Stativstange 47 cm befestigen.
- 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 40 KHz anschließen.
- Ultraschallwandler **(f)** mit Leybold-Muffe an Stativstange 25 cm befestigen, an Eingang **(g)** des AC-Verstärkers anschließen und so ausrichten, dass sich beide Ultraschallwandler in gleicher Höhe gegenüberstehen.
- Zur Vermeidung störender Interferenzen mit den an der Schiene reflektierten Ultraschallwellen beide Ultraschallwandler mit Pappe oder Papier umwickeln und diese Abschirmung etwa 10 cm nach vorne überstehen lassen.

Einstellung der Resonanzfrequenz:

- Generator 40 kHz 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 Messkabel BNC/4 mm in Oszilloskop einspeisen (siehe Fig. 2).
- Ausgangssignal mit dem Oszilloskop beobachten und Ausrichtung der beiden Ultraschallwandler verbessern.
- Frequenz am Generator 40 kHz so verstellen, 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 0,7 V einstellen.

Messung der Frequenz des Ultraschallwandlers:

- Digitalzähler einschalten, Ausgangssignal des AC-Verstärkers über Messkabel BNC/4 mm in Eingang B einspeisen (siehe Fig. 3) und Taste B drücken.
- Taste Frequency drücken und Einheit Hz wählen
- Eingangsschwelle an Eingang B mit Drehpotentiometer **(h)** auf 0,7 V stellen.

Der ruhende Beobachter hört die sich bewegende Schallquelle also mit der Frequenz

$$f = \frac{1}{T} = \frac{f_0}{1 - \frac{v}{c}} \quad (VI)$$

Bewegt sich hingegen der Beobachter mit der Geschwindigkeit v auf eine ruhende Schallquelle zu, so beträgt der Abstand zwischen den Wellenfronten λ_0 . Diese breiten sich im Medium mit der Geschwindigkeit c , erreichen den sich bewegenden Beobachter jedoch im Zeitabstand

$$T = \frac{\lambda_0}{c + v} = \frac{T_0}{1 + \frac{v}{c}} \quad (VII)$$

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

$$f = \frac{1}{T} = f_0 \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right) \quad (VIII)$$

Gl. (VI) und (VIII) liefern für große Geschwindigkeiten v unterschiedliche Ergebnisse. Der Unterschied kann jedoch bei kleinen Geschwindigkeiten vernachlässigt werden. Die Frequenzänderung

$$\Delta f = f - f_0 = f_0 \cdot \frac{v}{c} \quad (IX)$$

ist dann proportional zur Geschwindigkeit v .

Im Versuch dienen zwei baugleiche Ultraschallwandler je nach Beschaltung als Sender (Schallquelle) und Empfänger (Beobachter). Ein Ultraschallwandler wird auf einem Messwagen mit

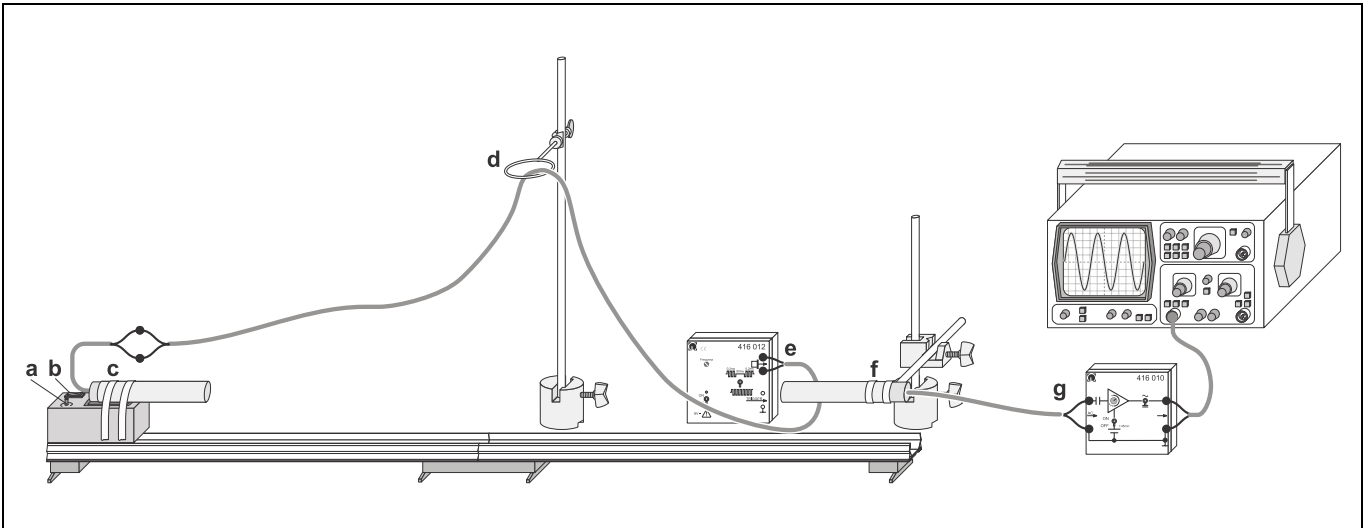


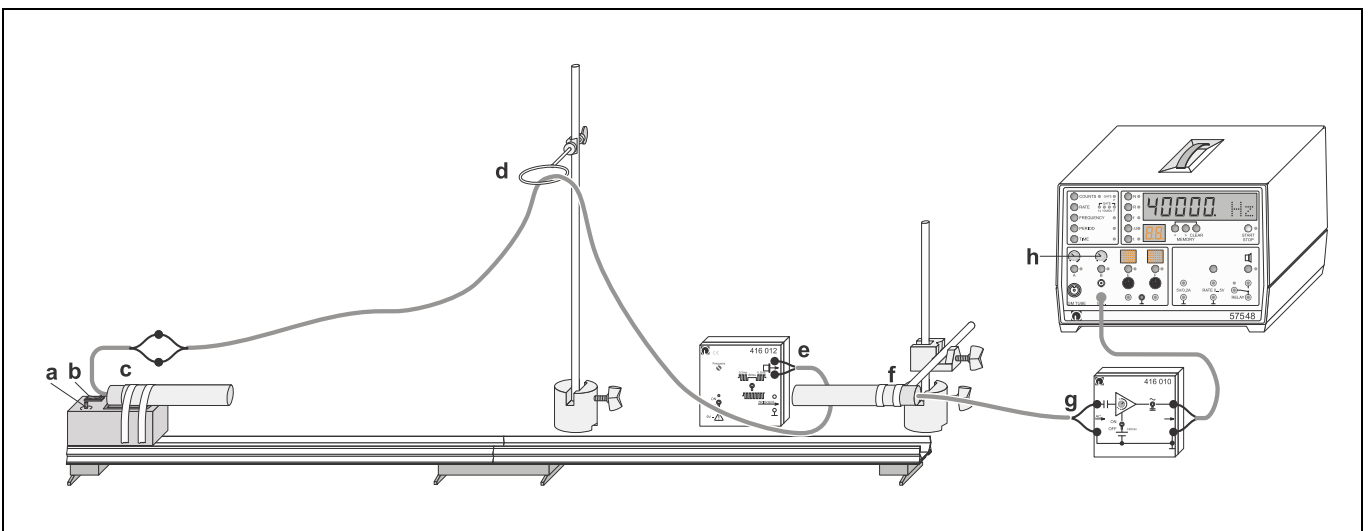
Fig. 2 Aufbau zur Einstellung der Resonanzfrequenz

Durchführung

Messung der Frequenzänderung bei bewegter Ultraschallquelle

- Geschwindigkeit v des Messwagens mit Potentiometer (a) einstellen.
- Antriebsmotor mit Dreistufenschalter (b) einschalten, Messwagen zur Bestimmung der Geschwindigkeit z. B. Messstrecke $\Delta s = 1$ m fahren lassen und mit Stoppuhr die benötigte Zeit Δt messen und notieren.
- Antriebsmotor mit Dreistufenschalter ausschalten, mit Taste START STOP des Digitalzählers Messung der Frequenz f_0 starten und durch erneuten Tastendruck beenden.
- Dreistufenschalter betätigen, Messwagen mit zuvor bestimmter Geschwindigkeit nach „rechts“ fahren lassen und Frequenz f messen und notieren.
- Antriebsmotor mit Dreistufenschalter ausschalten und Ruhfrequenz f_0 erneut bestimmen.
- Dreistufenschalter betätigen, Messwagen mit gleicher Geschwindigkeit nach „links“ fahren lassen und Frequenz f messen und notieren.
- Messwagen erneut nach „rechts“ und anschließend 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 zwei weitere Geschwindigkeiten v wiederholen.

Fig. 3 Versuchsaufbau zur Untersuchung des Doppler-Effekts mit Ultraschallwellen bei bewegter Schallquelle



Messbeispiel

Messstrecke: $\Delta s = 1 \text{ m}$

Tab. 1: Zusammenstellung der Messwerte für die unverschobene Frequenz f_0 und die verschobene Frequenz f

$\frac{\Delta t}{\text{s}}$	Richtung	$\frac{f_0}{\text{Hz}}$	$\frac{f}{\text{Hz}}$
5,0	rechts	40144	40168
	links	40143	40121
	rechts	40142	40166
	links	40142	40117
6,0	rechts	40188	40207
	links	40186	40165
	rechts	40186	40204
	links	40185	40166
7,7	rechts	40193	40207
	links	40187	40171
	rechts	40185	40201
	links	40183	40167
10,0	rechts	40147	40157
	links	40147	40135
	rechts	40147	40157
	links	40146	40136

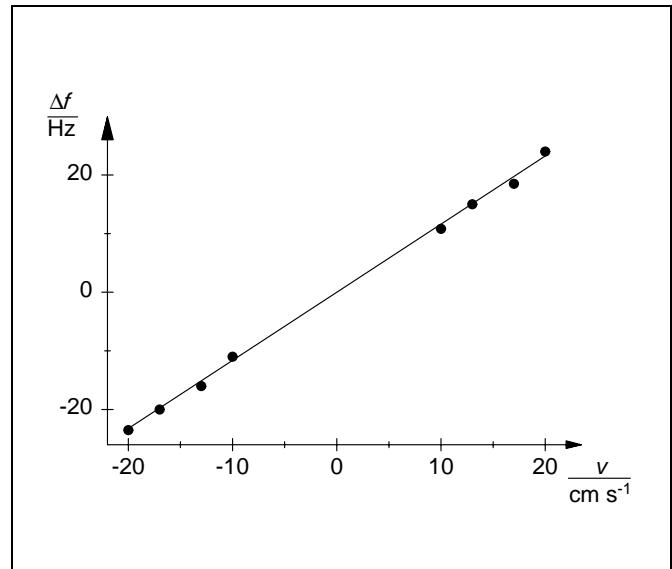


Fig. 4 Frequenzänderung $\Delta f = f - f_0$ in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit v des Messwagens.

Auswertung und Ergebnis

Bestimmung der Frequenzänderung:

Tab. 1 enthält zu jeder Geschwindigkeit v bzw. Fahrzeit Δt des Messwagens (bei Beachtung des Vorzeichens) zwei Messwertpaare f und f_0 . Man berechnet zunächst die Differenzen $\Delta f = f - f_0$ und bildet deren Mittelwerte. Das Ergebnis ist in Tab. 2 zusammengefasst. Zugeordnet sind die aus Messstrecke Δs und Fahrzeit Δt berechneten Geschwindigkeiten v des Messwagens.

Tab. 2: Frequenzänderung $\Delta f = f - f_0$ in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit v des Messwagens.

$\frac{v}{\text{ms}^{-1}}$	$\frac{\Delta f}{\text{Hz}}$
-0,2	-23,5
-0,17	-20
-0,13	-16
-0,1	-11
0,1	10
0,13	15
0,17	18,5
0,2	24

Bestätigung der Proportionalität zwischen Frequenzänderung und Geschwindigkeit:

Fig. 4 zeigt eine graphische Darstellung der Werte aus Tab. 2. Sie liegen im Rahmen der Messgenauigkeit auf der eingezeichneten Ursprungsgeraden. Die Frequenzänderung ist somit proportional zur Geschwindigkeit der Schallquelle.

Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Luft:

Die Steigung der Ursprungsgeraden in Fig. 4 ist

$$\frac{f_0}{c} = 1,162 \frac{\text{Hz}}{\text{cm s}^{-1}}$$

Der Mittelwert der gemessenen Ruhefrequenzen in Tab. 1 ist $f_0 = 40165 \text{ Hz}$. Mit diesen Werten erhält man für die Schallgeschwindigkeit c in Luft.

$$c = 346 \text{ m s}^{-1}$$

Literaturwert:

$$c(25 \text{ °C}) = 346,3 \text{ m s}^{-1}$$

Zusatzinformation

Der Versuch zum Dopplereffekt kann auch mit bewegtem Beobachter durchgeführt werden. Dazu muss der Ultraschallwandler auf dem Messwagen über das Verbindungskabel an den Eingang des AC-Verstärkers und der feststehende Ultraschallwandler an den Ausgang des Generators 40 kHz angeschlossen werden.

Zu achten ist auf eine sorgfältige Ausrichtung der Ultraschallwandler zueinander und auf die geeignete Wahl der Verstärkung, da die Amplitude der Ausgangssignale in jedem Fall über der Eingangsschwelle des Digitalzählers liegen muss.