Interferenz von Schallwellen

Das Wort *Interferenz* verbindet man meist mit dem Doppelspaltversuch der Optik. Der zeigt, dass sich Licht wie eine Welle verhält. Trifft der Berg einer Welle aus dem einen Spalt auf das Tal einer Welle aus dem anderen Spalt, addieren sich die Auslenkungen von Berg und Tal so, dass die Welle verschwindet. Das Licht löscht sich aus. Trifft dagegen Berg auf Berg oder Tal auf Tal, verstärkt sich das Licht – im Idealfall auf die vierfache Intensität. Lässt man das Licht genügend weit hinter dem Doppelspalt auf einen Schirm fallen, beobachtet man dort helle und dunkle Streifen, die parallel zu den Spalten verlaufen. Voraussetzung ist, dass die beiden Spalte ihr Licht im gleichen Takt aussenden. Dazu beleuchtet man sie von hinten mit ein und derselben Lichtquelle.

Interferenz bedeutet, dass sich beim Zusammentreffen zweier oder mehrerer Wellen deren Auslenkungen addieren. Quadriert man die Summe der Auslenkungen, erhält man die (Gesamt-) Intensität der sich überlagernden Wellen. Sie kann Null sein. Intensitätsverteilungen, die sich durch Interferenz erklären lassen, deuten immer auf ein Wellenphänomen hin. Wasserwellen, Lichtwellen (elektromagnetische Wellen), Erdbebenwellen und Gravitationswellen beispielsweise zeigen Interferenzeffekte.

Hier soll gezeigt werden, dass *Schallwellen* interferieren. Dazu dient folgendes Experiment: Zwei Lautsprecher Q_1 und Q_2 werden im Abstand D = 20 cm voneinander aufgestellt und so ausgerichtet, dass sie in dieselbe Richtung strahlen. Damit sie gleichphasig schwingen, werden sie an den Ausgang eines und desselben *NF*-Generators angeschlossen. Der Generator liefert eine Sinusschwingung der Frequenz f. Ein Schallpegelmesser bewegt sich auf einer Geraden, die im Abstand L = 0,96 m parallel zur Verbindungslinie der Lautsprecher verläuft. Er misst dort die Intensitätsverteilung des Schallfeldes als Funktion des Ortes auf dieser Geraden. Das Prinzip der Messanordnung zeigt Abbildung 1, Fotos des Aufbaus sind in den Abbildungen 2 und 3 zu sehen.

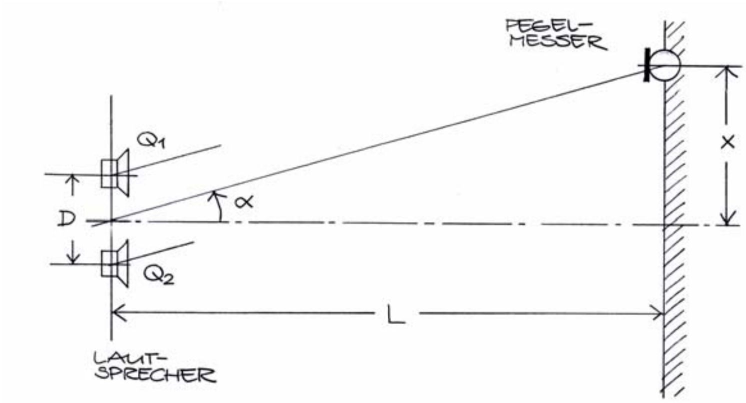

Abbildung 1 Prinzipskizze der Messanordnung

Wie aus den Fotos ersichtlich, liegt der Pegelmesser auf einem Rollenwagen, der sich auf einer Metallschiene bewegt. Der Wagen wird durch zwei dünne Seile gehalten, die an ihm mit gleicher Kraft, aber in entgegengesetzter Richtung parallel zur Schiene ziehen. Dazu werden die Enden der Seile jeweils über eine Umlenkrolle geführt und mit einem geeigneten (kleinen) Gewichtsstück versehen. Eins der Seile wird „angetrieben" und zieht den Wagen über die Schiene. Es ist in der Nähe der Umlenkrolle um die Achse eines Experimentiermotors gewickelt, der sich (langsam) dreht. Damit das Seil nicht durchrutscht, werden etwa 2 Windungen um die Achse gelegt. Der Motor läuft mit konstanter Drehzahl, so dass sich Wagen und Pegelmesser mit konstanter Geschwindigkeit bewegen. Die vom Pegelmesser gelieferten Daten werden in einem Datenlogger gespeichert. Die Fahrgeschwindigkeit des Rollenwagens wird vorab gemessen. Da der Datenlogger die Schallintensität mit bekannter (und konstanter) Abtastrate misst, ist das Produkt aus

Geschwindigkeit und Abtastrate gleich der Differenz der Positionen des Pegelmessers für benachbarte Messpunkte.

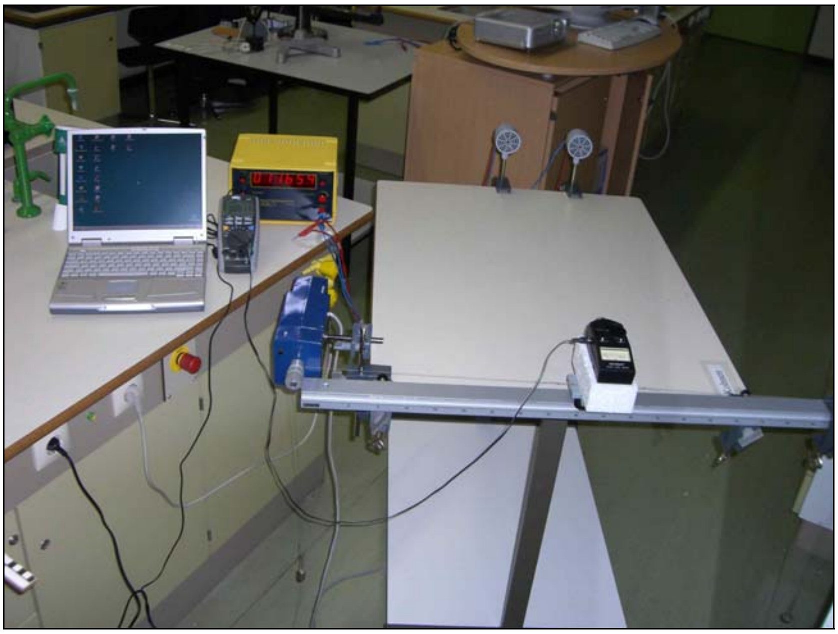

Abbildung 2 Messanordnung (1)

Abbildung 3 Messanordnung (2)

Gemessen wurde die Intensitätsverteilung für vier verschiedene Frequenzen f = 12,03 kHz, 15,08 kHz, 18,05 kHz und 21,09 kHz. Das Ergebnis zeigen die Abbildungen 4 bis 7. Die Position des Pegelmessers wurde dabei von dem Punkt aus gemessen, der beim Einschalten des Datenloggers eingenommen wurde (kurz nach dem Beginn der Fahrt des Rollenwagens). Das heißt, der Nullpunkt der Skala auf der waagerechten Achse ist willkürlich. Für die nachfolgende Auswertung ist das unerheblich (s. unten).

Die Intensitätsverteilungen zeigen, abgesehen von einem gewissen Rauschpegel, die typischen Maxima und Minima eines Interferenzmusters. Im Folgenden soll aus dem Abstand benachbarter Minima ein Wert für die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden – zumindest näherungsweise.

Dazu eine kurze Rechnung: Wie in Abbildung 1 bezeichnet, sei der Ort des Pegelmessers gegeben durch den Abstand x von der Mittelsenkrechten der Strecke, die Q_1 und Q_2 verbindet (in der Abbildung strichpunktiert). Er sei von den Lautsprechern so weit entfernt, dass die von Q_1 und Q_2 auf den Pegelmesser zulaufenden Strahlen parallel sind (Bedingung für *Fraunhofersche Beugung*, nur in etwa erfüllt). Dann ist der Gangunterschied Δs der von den Lautsprechern ausgehenden Wellenzüge am Ort x gegeben durch

(1) $\Delta s = D \cdot \sin\alpha$.

Dabei ist α der Winkel zwischen der Richtung, unter dem der Pegelmesser steht, und der Mittelsenkrechten. Minima der Intensität ergeben sich, wenn Δs ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge λ ist. Dann nämlich trifft der Berg der Welle aus dem einen Lautsprecher

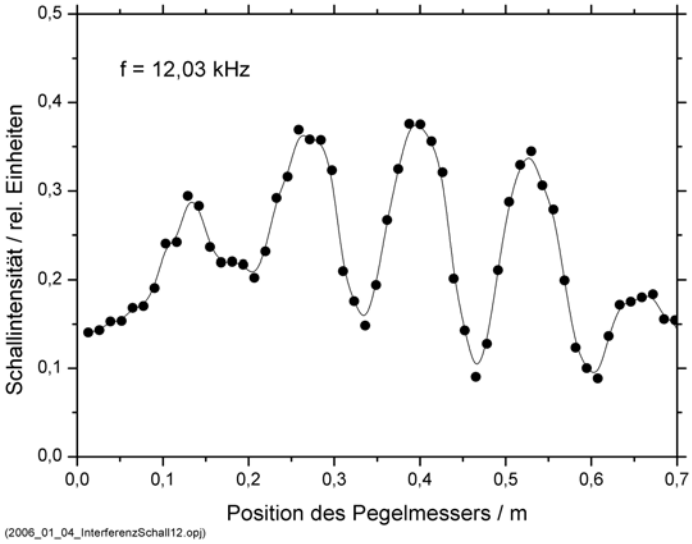

Abbildung 4 Intensitätsverteilung, f = 12,03 kHz.

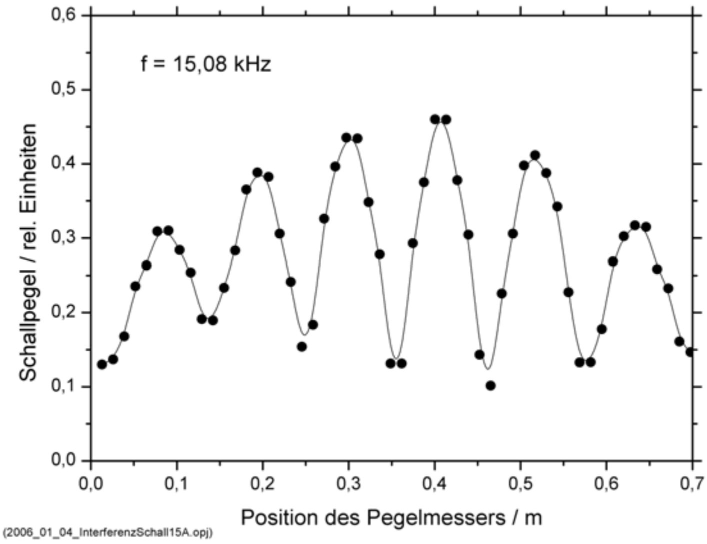

Abbildung 5 Intensitätsverteilung, f = 15,08 kHz.

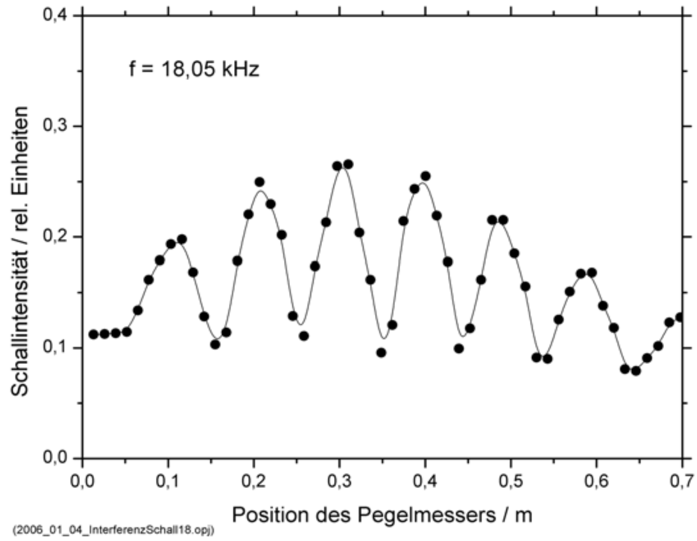

Abbildung 6 Intensitätsverteilung, f = 18,05 kHz.

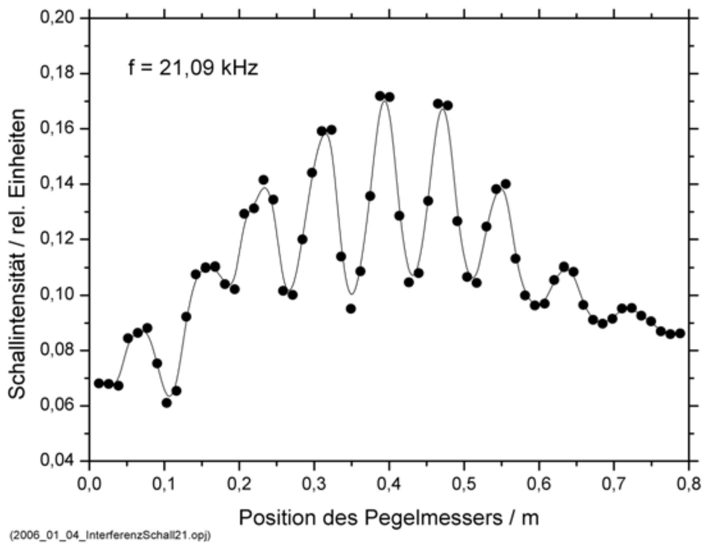

Abbildung 7 Intensitätsverteilung, f = 21,09 kHz.

auf das Tal einer Welle aus dem anderen Lautsprecher. Das heißt, die Interferenz*minima* werden für Winkel α beobachtet, die gegeben sind durch

(2) $$\sin\alpha = \frac{2n-1}{2}\cdot\frac{\lambda}{D}\ , \quad n \in Z\ .$$

Andererseits folgt aus der Geometrie der Anordnung für den Ort *x* des Pegelmessers

(3) $$\tan\alpha = \frac{x}{L}.$$

Eine weitere Näherung ist die, dass wir sin $\alpha \cong$ tan α setzen. Sie gilt für kleine Winkel α und ist auch nur in etwa erfüllt. Denn α ist bis zu 22° groß, und der Unterschied zwischen sin22° (0,3746) und tan22° (0,4040) beträgt immerhin 8%.

In dieser Näherung sind die Orte x, unter denen der Pegelmesser *Minima* registriert, gegeben durch

$$x = \frac{2n-1}{2} \cdot \frac{\lambda L}{D}, \qquad n \in Z. \tag{4}$$

Der Abstand Δx *benachbarter* Minima ist damit

$$\Delta x = \frac{\lambda L}{D} = \frac{cL}{D} \cdot \frac{1}{f}. \tag{5}$$

Dabei wurde $\lambda = c/f$ gesetzt, wobei c die Schallgeschwindigkeit in Luft ist.

Zur Auswertung bestimmen wir für die vier genannten Intensitätsverteilungen jeweils den Abstand Δx *benachbarter* Minima und tragen diesen als Funktion von $1/f$ in ein Koordinatensystem ein. Die Ausgleichsgerade durch die Messpunkte hat nach Gl. (5) die Steigung cL/D. Da L und D bekannt sind, ergibt sich daraus der Wert für c.

Tabelle 1 Abstand Δx zweier benachbarter Minima als Funktion der Frequenz f

f / kHz	f^{-1}/ kHz^{-1}	Δx / m
12,03	0,0831	0,131 ± 0,004
15,08	0,0663	0,107 ± 0,004
18,05	0,0554	0,097 ± 0,003
21,09	0,0474	0,082 ± 0,004

Tabelle 1 zeigt die gemessenen Abstände Δx und Abbildung 8 deren Verlauf als Funktion von $1/f$. Die Anpassung einer Geraden durch den Nullpunkt ergibt als Steigung $cL/D = 1{,}653 \pm 0{,}026$ m·kHz = 1653 ± 26 m/s. Multiplikation mit $D/L = 0{,}2$ m/0,96 m ergibt als Schallgeschwindigkeit $c = 344$ m/s. Der von der Anpassungsroutine angegebene statistische Fehler beträgt ± 5 m/s. Systematische Fehler sind kaum abzuschätzen, aber mindestens von derselben Größenordnung.

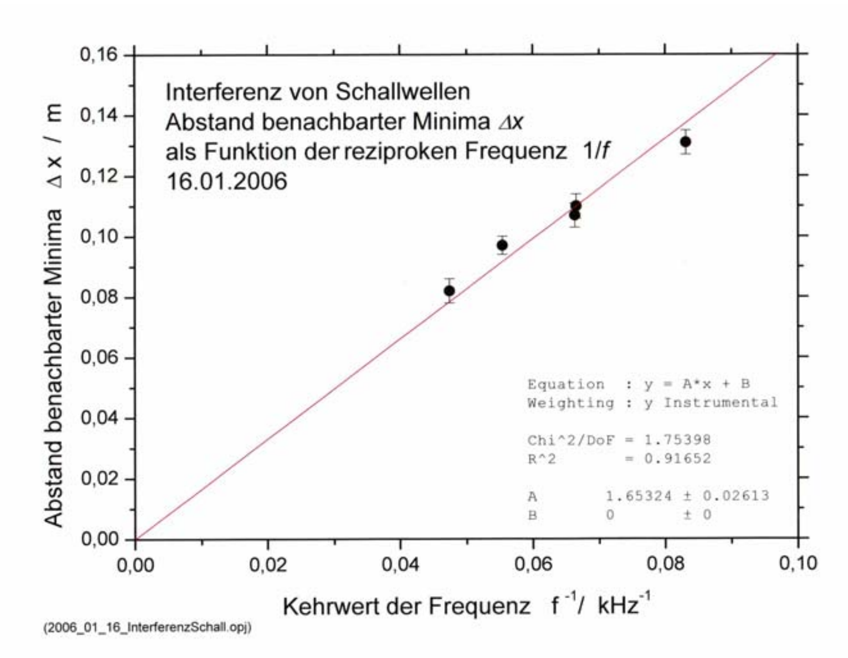

Abbildung 8 Schallgeschwindigkeit aus dem Abstand der Interferenzminima. Siehe Text.

Nimmt man sie zu ± 10 m/s an und addiert sie zu dem statistischen Wert, erhält man

$c = 344 \pm 15$ m/s.

Dieser Wert stimmt innerhalb der Fehlergrenzen mit dem theoretisch berechneten überein. Der ergibt sich aus der Formel für die Schallgeschwindigkeit in einem (idealen) Gas,

$$(6) \qquad c = \sqrt{\kappa \frac{RT}{M}} \, ,$$

wobei $\kappa = 1{,}402$ der Adiabatenexponent für ein zweiatomiges Gas, $R = 8{,}3145$ J/(mol·K) die universelle Gaskonstante und $M = 0{,}02896$ kg/mol die Molmasse der Luft ist. Für eine Temperatur von 20° C, entsprechend $T = 293{,}15$ K erhält man $c = 343{,}5$ m/s.

Betrachtet man die Näherungen, die bei der Auswertung des Interferenzmusters gemacht wurden, ist die Übereinstimmung von experimentellem und theoretischen Wert erstaunlich.