

# 54 Schallwellen und Lärm

## 54 Sound waves and noise

### Hinweise

- Die Abschnitte *Einleitung* und *Das Gehör* geben Hintergrundinformationen. Sie sind für die Durchführung nicht wesentlich und können übersprungen werden.
- Für das erste Lesen wird empfohlen, zunächst die Abschnitte *Aufgaben* (3) und *Durchführung der Versuche* (4) zu lesen.

### 1 Einleitung

Lärm leitet sich aus dem spätmittelhochdeutschen "Alerm" ab, das aus dem italienischen "all' arme" entstanden ist und "an die Waffen" heisst. Diese Alarmmeldung ist für das Gehör bestimmt und weist auf dessen warnende Funktion hin. Das Ohr kann man physiologisch weder schliesen noch abstellen, was natürlich auch sinnvoll ist für eine Warnanlage. Während des Schlafens kann Lärm beträchtlich stören, so dass man auch nach langem Schlaf unausgeruht erwacht. Ist die Schlafstörung noch stärker (schriller Wecker), so reagiert man sofort auf diese Alarmmeldung und schreckt auf.

*Lärm stört ungemein und wird immer von den anderen verursacht!*

In den heutigen Städten ist die mittlere Schallintensität etwa 1000 mal höher als in der Natur, an die unser

### Notes

- The sections Introduction and The Ear provide background information. They are not essential for the experiment and can be skipped.
- For the initial reading, it is recommended to start by reading the sections *Tasks* (3) and *Conducting the Experiments* (4).

### 1 Introduction

The word "noise" is derived from the late Middle High German word "Alerm," which in turn comes from the Italian word "all' arme," meaning "to the arms." This alarm signal is intended for the auditory system and highlights its warning function. Physiologically, the ear cannot be closed or turned off, which is, of course, useful for a warning system. During sleep, noise can be significantly disruptive, leading to a feeling of restlessness even after a long slumber. If the sleep disturbance is more intense, such as a shrill alarm clock, it immediately triggers a response, causing one to wake up.

*Noise is incredibly disturbing and is always caused by others!*

In today's cities, the average sound intensity is about 1000 times higher than in nature, to which our ears are adapted. As a result, constant false alarms are generated, suppressed, and gradually place a significant burden

Ohr angepasst ist. Dadurch werden dauernd Fehlalarme erzeugt, welche verdrängt werden und so die Psyche mit der Zeit stark belasten. Es ist sehr schwierig, diese mittleren Lautstärken als Ursache gesundheitlicher Schäden medizinisch nachzuweisen. Zudem ist es von Bedeutung, ob die akustische Einwirkung Informationen für die belästigte Person enthält oder nicht (z.B. ein Gespräch, ein wimmerndes Kind, Musik etc.). Entsprechend dem Informationsgehalt ist auch die Reaktion. Beispielsweise kann ein Musikstück jemanden so stark stören, dass er gleichzeitig keine andere Tätigkeit mehr ausüben kann und dieses Stück als Lärm empfindet. Für eine andere Person wirkt das gleiche Musikstück stimulierend, also sicher nicht als Lärm.

Tatsächlich lassen sich störende akustische Signale in mittlerer Lautstärke nicht auf eine einfache Art definieren. Unbestritten ist aber, dass der Lärm eine **psychische Störung** darstellt, welche über längere Zeit Gesundheit und Wohlbefinden beeinträchtigt, aber selten als (Mit-) Ursache dieser Störung erkannt wird. Lautstärken nahe der Schmerzgrenze führen zu eindeutigen Gesundheitsschäden. Untersuchungen über den Schlaf zeigen, dass auch kleinere und mittlere Lautstärken zu medizinisch nachweisbaren Schäden führen. Man überlege sich einmal, welche Geräusche am meisten stören, wie laut sie sind und woher sie kommen. Dabei findet man sicher eine grosse Streuung der Lautstärken.

## 1.1 Das Gehör

Das Ohr vermag sehr kleine Druckschwankungen in der Luft (Schallwellen) mit Frequenzen zwischen ca. 16 und 16000 Hz (1 Hz = 1 Schwingung pro Sekunde) wahrzunehmen. Am Schnitt durch das menschliche Ohr (Fig. 1) wollen wir die physikalischen Aspekte des Hörvorgangs vom Eintreffen der Schallwelle auf die Hörmuschel bis zur Reizübertragung auf die Sinneszellen diskutieren.

Die ankommende Welle wird von der Ohrmuschel 1 aufgenommen, durch den Gehörgang 2 geleitet und trifft auf das Trommelfell 3 (starke Dämpfung). Dieses nimmt die Schwingung auf und gibt diese mechanisch via Gehörknöchelchen 4 (Hammer, Amboss und Steigbügel) zum ovalen Fenster 5 weiter. Dabei werden kleine Druckschwankungen der leichten Luft zu fortlaufenden Wellen im tausendmal schwereren Medium der Schneckenflüssigkeit umgewandelt. Würde die Schallwelle direkt auf das ovale Fenster 5 auftreffen, so würde nur ein Tausendstel der schon kleinen Energie der Schallwelle übertragen und der Rest reflektieren. Die knochige, schneckenhausartige Form 6 mit drei Umgängen enthält zwei Kanäle. Die Wel-

on one's psyche over time. It is very difficult to medically prove that these average noise levels cause health damage. Additionally, it matters whether the acoustic exposure contains information for the affected person or not (e.g., a conversation, a crying child, music, etc.). The reaction varies depending on the informational content. For instance, a piece of music can be so disruptive to someone that they cannot engage in any other activity at the same time and perceive this piece as noise. However, the same piece of music can be stimulating for another person and is certainly not perceived as noise.

Indeed, defining disturbing acoustic signals at medium volumes is not straightforward. However, it is undisputed that noise represents a **psychological disturbance** that impairs health and well-being over an extended period but is rarely recognized as a (contributing) cause of this disturbance. Sound levels near the threshold of pain lead to clear health damage. Studies on sleep have shown that even lower and medium sound levels result in medically detectable harm. Consider which noises bother you the most, how loud they are, and where they come from. You will undoubtedly find a wide range of noise levels.

### 1.1 The Ear

The ear is capable of perceiving very small air pressure fluctuations (sound waves) with frequencies ranging from approximately 16 to 16000 Hz (1 Hz = 1 oscillation per second). In this section, we will discuss the physical aspects of the hearing process from the arrival of the sound wave at the earlobe to the transmission of the stimulus to the sensory cells, as shown in Figure 1.

The incoming wave is captured by the earlobe 1, directed through the ear canal 2, and reaches the eardrum 3 (with strong damping). The eardrum absorbs the vibration and mechanically transmits it through the auditory ossicles 4 (hammer, anvil, and stirrup) to the oval window 5. During this process, small pressure fluctuations in the lightweight air are transformed into continuous waves in the thousand times denser medium of the cochlear fluid. If the sound wave were to directly impact the oval window 5, only a thousandth of the already small energy of the sound wave would be transmitted, with the rest being reflected. The bony, cochlea-shaped structure 6 with three turns contains two channels. The wave travels through the cochlear fluid from the oval window through the "first" channel (scala vestibuli), transmitting the acoustic information to sensory organs via fine hairs. At the narrow end, the wave enters the "second" channel (scala tympani)

le läuft in der Schneckenflüssigkeit vom ovalen Fenster durch den “ersten” Kanal (Vorhofstreppe) und übermittelt den Sinnesorganen über feine Härchen die akustische Information. Am engen Ende mündet die Welle in den “zweiten” Kanal (Paukentreppe) und läuft parallel zurück zum runden Fenster 7, wo sie vernichtet wird (starke Dämpfung).

and runs parallel back to the round window 7, where it is extinguished (with strong damping).

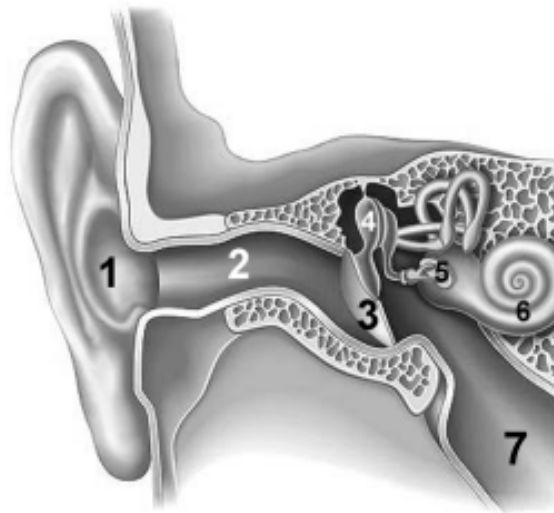


Fig. 1

## 2 Theorie

### 2.1 Schallintensität

Die Schallintensität  $I$ , ein Mass für die Schall- oder Lautstärke, ist definiert als die pro Zeit- und Flächeneinheit senkrecht auf ein Fläche treffende Energie (Einheit:  $\text{Wm}^{-2}$ ). Für eine ebene Welle kann man demnach  $I$  als das Produkt der Schallenergie pro Volumen  $E$  (Einheit:  $\text{Jm}^{-3}$ ) und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle  $v$  ausdrücken:

$$I = Ev \quad (1)$$

Die Wellenenergie ist auf zwei Arten gespeichert, als kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$  (Bewegung

## 2 Theory

### 2.1 Sound Intensity

Sound intensity  $I$ , a measure of sound or loudness, is defined as the energy per unit time and area that strikes a surface perpendicular to the wave (unit:  $\text{Wm}^{-2}$ ). For a plane wave,  $I$  can be expressed as the product of the sound energy per unit volume  $E$  (unit:  $\text{Jm}^{-3}$ ) and the wave's propagation velocity  $v$ :

$$I = Ev \quad (1)$$

Wave energy is stored in two ways: as kinetic energy  $E_{\text{kin}}$  (movement of air molecules) and as potential energy  $E_{\text{pot}}$  (pressure fluctua-

der Luftmoleküle), und als potentielle Energie  $E_{\text{pot}}$  (Druckschwankungen). Örtlich und zeitlich findet ein ständiger Wechsel zwischen den beiden Energieformen statt. Die Wellenlehre zeigt, dass sich im Mittel die totale Energie  $\overline{E}$  je hälftig auf  $E_{\text{kin}}$  und  $E_{\text{pot}}$  aufteilt:

$$\overline{E_{\text{kin}}} = \overline{E_{\text{pot}}} = \frac{1}{2} \overline{E} \quad (2)$$

Wir können uns also auf die Berechnung von  $\overline{E_{\text{kin}}}$  beschränken.

$$\overline{E_{\text{kin}}} = \frac{1}{2} \rho \overline{u^2} \quad (3)$$

Dazu benutzen wir für  $u(x, t)$  den Ansatz einer ebenen, harmonischen Welle:

$$u(x, t) = u_1 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft\right) \quad (4)$$

wobei  $\lambda$  die Wellenlänge und  $f$  die Frequenz der Welle sind. Diese beiden Grössen hängen mit der Schallgeschwindigkeit  $v$  über die Gleichung

$$v = f\lambda \quad (5)$$

zusammen. Für Schallmessungen ist es praktischer, an Stelle der in Gl. (4) auftretenden Schwingungsamplitude  $u_1$  die Druckamplitude  $p_1$  zu bestimmen. Wir setzen für den Druck ebenfalls eine harmonische Welle an:

$$p(x, t) = p_1 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft\right) \quad (6)$$

Gl.(18) stellt einen Zusammenhang zwischen den Ableitungen der beiden Wellen (4) und (6) her, den wir benützen, um die Amplituden zu verknüpfen. Mit

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -2\pi f u_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft\right) \quad (7)$$

und

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{2\pi}{\lambda} p_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft\right) \quad (8)$$

sowie den Gleichungen (18) und (5) folgt:

tions). There is a continuous exchange between these two forms of energy in space and time. Wave theory shows that on average, the total energy  $\overline{E}$  is equally distributed between  $E_{\text{kin}}$  and  $E_{\text{pot}}$ :

$$\overline{E_{\text{kin}}} = \overline{E_{\text{pot}}} = \frac{1}{2} \overline{E} \quad (2)$$

We can focus on calculating  $\overline{E_{\text{kin}}}$ :

$$\overline{E_{\text{kin}}} = \frac{1}{2} \rho \overline{u^2} \quad (3)$$

Here, we use the assumption of a plane harmonic wave for  $u(x, t)$ :

$$u(x, t) = u_1 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft\right) \quad (4)$$

where  $\lambda$  is the wavelength and  $f$  is the frequency of the wave. These two quantities are related to the speed of sound  $v$  through the equation:

$$v = f\lambda \quad (5)$$

For sound measurements, it is more practical to determine the pressure amplitude  $p_1$  instead of the oscillation amplitude  $u_1$ . We also assume a harmonic wave for pressure:

$$p(x, t) = p_1 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft\right) \quad (6)$$

Equation (18) establishes a relationship between the derivatives of the two waves (4) and (6) that we can use to link the amplitudes. With

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -2\pi f u_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft\right) \quad (7)$$

and

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{2\pi}{\lambda} p_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft\right) \quad (8)$$

$$u_1 = \frac{p_1}{v\rho} \quad (9)$$

Einsetzen in Gl.(4) ergibt für das Quadrat der Geschwindigkeit:

$$u^2 = \frac{p_1^2}{v^2\rho^2} \sin^2\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft\right) \quad (10)$$

Die Mittelung von (10) über viele Schwingungsperioden ergibt mit  $\overline{\sin^2 y} = \frac{1}{2}$ :

$$\overline{u^2} = \frac{p_1^2}{2v^2\rho^2} \quad (11)$$

Einsetzen in Gl.(3) und (1) liefert schliesslich:

$$I = \overline{E}v = 2\overline{E_{\text{kin}}}v = \frac{p_1^2}{2v\rho} \quad (12)$$

Atmosphärendruck	10 <sup>5</sup> Pa
Druckunterschied bei Kniebeuge ( $\Delta h = 0.5$ m)	5 Pa
Gespräch	0.05 Pa
Hörbereich – Druck	20 · 10 <sup>-6</sup> Pa – 20 Pa
Hörbereich – Intensität	10 <sup>-12</sup> Wm <sup>-2</sup> – 10 Wm <sup>-2</sup>

Wäre unser Gehör noch empfindlicher, so würde man das thermische Rauschen der Luftmoleküle hören. Der Hörbereich umfasst zehn Oktaven, das entspricht dem Frequenzspektrum von 16 Hz bis 16000 Hz.

## 2.2 Schallpegel

Das Gehör kann, wie die meisten Sinnesorgane, kleine Unterschiede im niedrigen Intensitätsbereich sehr deutlich unterscheiden, welche im höheren Intensitätsbereich nicht mehr wahr-

and equations (18) and (5), we obtain:

$$u_1 = \frac{p_1}{v\rho} \quad (9)$$

Substituting this into equation (4) gives the square of the velocity:

$$u^2 = \frac{p_1^2}{v^2\rho^2} \sin^2\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft\right) \quad (10)$$

Averaging (10) over many oscillation periods with  $\overline{\sin^2 y} = \frac{1}{2}$  yields:

$$\overline{u^2} = \frac{p_1^2}{2v^2\rho^2} \quad (11)$$

Substituting this into equations (3) and (1) finally gives:

$$I = \overline{E}v = 2\overline{E_{\text{kin}}}v = \frac{p_1^2}{2v\rho} \quad (12)$$

Atmospheric pressure	10 <sup>5</sup> Pa
Pressure difference during knee bend ( $\Delta h = 0.5$ m)	5 Pa
Normal conversation	0.05 Pa
Auditory range – Pressure	20 · 10 <sup>-6</sup> Pa – 20 Pa
Auditory range – Intensity	10 <sup>-12</sup> Wm <sup>-2</sup> – 10 Wm <sup>-2</sup>

If our hearing were more sensitive, we would hear the thermal noise of air molecules. The audible range covers ten octaves, corresponding to the frequency spectrum from 16 Hz to 16000 Hz.

## 2.2 Sound Level

Like most sensory organs, the human ear can distinguish small differences in the low-intensity range that become imperceptible in the higher-intensity range. This property of the ear is best

nehmbar sind. Diese Eigenschaft des Gehörs wird mathematisch mit dem Zehnerlogarithmus am besten angenähert. Für die Vergleichsmessung der Schallintensität  $I$  hat man die Hörschwelle  $I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$  (bzw.  $p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$ ) bei 1 kHz als Referenzgrösse genommen.

Der Schallpegel  $L$  als Mass der Schallstärke ist definiert als der zehnfache Zehnerlogarithmus aus dem dimensionslosen Verhältnis zwischen den Intensitäten  $I$  und  $I_0$ :

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (13)$$

Mit Gleichung (12) lässt sich der Schallpegel auch durch den Druck beschreiben.

$$L = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (14)$$

Die Einheit des Schallpegels ist Dezibel [dB], zu Ehren des Telephonerfinders Graham Bell. Zwischen dem Schallpegel und dem Lautstärkeempfinden des Gehörs gibt es frequenzabhängige Unterschiede. Das Lautstärkeempfinden des Ohres (Einheit: Phon) ist bei 1 kHz Ton dem Schallpegel (Einheit: dB) gleichgesetzt worden. Mit normalhörenden Personen im Alter von 18-25 Jahren wurden die Phonkurven (Fig. 2) erstellt.

Beispielsweise gibt die 60-Phon-Kurve an, welcher Schallpegel ein reiner Ton bei zweiohrigem Hören mit Schalleinfall von vorne haben muss, um gleich laut empfunden zu werden wie der 1 kHz-Ton von 60 dB (67 dB bei 100 Hz, 52 dB bei 4 kHz). Diese Eigenschaft des Gehörs wird messtechnisch angenähert durch den **A-Filter** (Fig. 3).

Der Mensch beurteilt Schallpegel-Änderungen folgendermassen:

approximated mathematically using the logarithm base 10. For the comparative measurement of sound intensity  $I$ , the hearing threshold  $I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$  (or  $p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$ ) at 1 kHz has been taken as the reference value.

Sound level  $L$ , as a measure of sound intensity, is defined as ten times the base 10 logarithm of the dimensionless ratio between intensities  $I$  and  $I_0$ :

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (13)$$

With Equation (12), sound level can also be described in terms of pressure:

$$L = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (14)$$

The unit of sound level is the Decibel [dB], named in honor of telephone inventor Graham Bell. There are frequency-dependent differences between sound level and the perceived loudness of the ear. The ear's loudness sensation (unit: Phon) has been equated to the sound level (unit: dB) for a 1 kHz tone. Phon curves (Fig. 2) were created using normally hearing individuals aged 18-25 years.

For example, the 60-Phon curve indicates the sound level a pure tone must have when heard binaurally with front sound incidence to be perceived as equally loud as a 1 kHz tone at 60 dB (67 dB at 100 Hz, 52 dB at 4 kHz). This property of the ear is approximated in measurement by the **A-filter** (Fig. 3).

Human perception of sound level changes as follows:

0 – 2 dB	Not perceptible (usually within measurement accuracy)
2 – 5 dB	Just perceptible, small change
5 – 10 dB	Clearly perceptible change
10 – 20 dB	Large and convincing changes

0 – 2 dB	nicht wahrnehmbar (meist innerhalb der Messgenauigkeit)
2 – 5 dB	gerade wahrnehmbar, kleine Veränderung
5 – 10 dB	deutlich wahrnehmbare Veränderung
10 – 20 dB	grosse und überzeugende Veränderungen

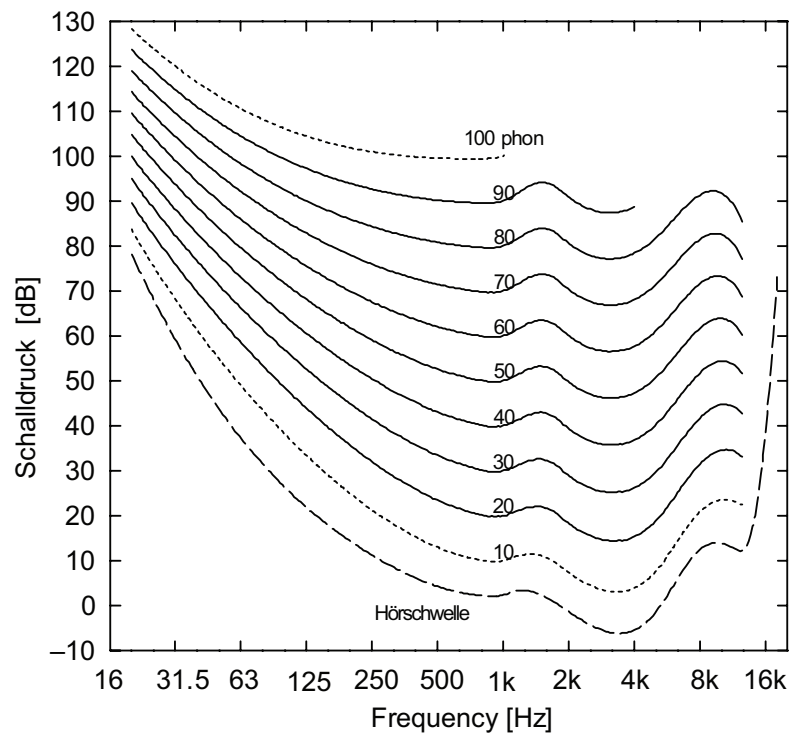


Fig. 2



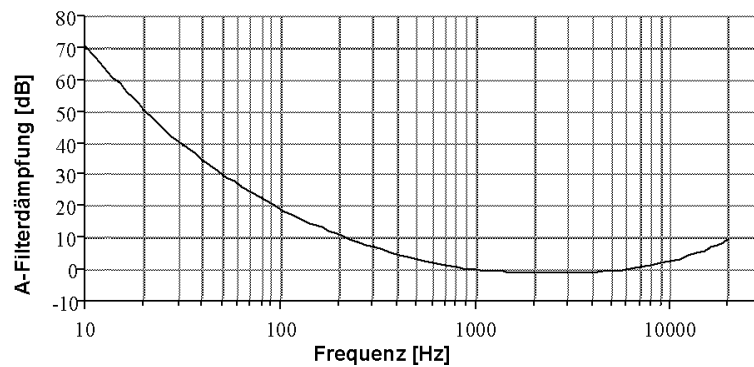


Fig. 3

### 2.3 Abstandsgesetz

Der Abstand  $r$  zur Schallquelle beeinflusst auch den Schallpegel. Bei einer Punktquelle wird die Fläche der kugelförmigen Schallausbreitung bei konstanter totaler Energie proportional zu  $r^2$  grösser. Somit nimmt die Intensität relativ zu einer Referenzdistanz  $r_0$  wie folgt ab:

$$I(r) = I(r_0) \frac{r_0^2}{r^2} \quad (15)$$

Der entsprechende Schallpegel nimmt dann nach Gl. (13) folgendermassen mit dem Abstand  $r$  ab<sup>1</sup>:

$$L(r) = L(r_0) - 20 \log \frac{r}{r_0} \quad (16)$$

Bei der Schallausbreitung entsteht ein kleiner Energieverlust (**Dissipation**) durch die innere Reibung der Luft. Dieser kann in Tabellenwerken nachgeschlagen werden. Ferner ist auch die "Bodenabsorption" zu berücksichtigen, welche vom Bodenabstand und von der Bodenbeschaffenheit abhängt. Dissipation und Absorption erschweren reproduzierbare Feldmessungen bzw. machen diese stark vom Messstandort und den meteorologischen Bedingungen abhängig.

<sup>1</sup>Herleitung von / Derivation of (16):

$$L(r) = 10 \log \frac{I(r)}{I_0} = 10 \log \left( \frac{I(r_0)}{I_0} \frac{r_0^2}{r^2} \right) = 10 \log \frac{I(r_0)}{I_0} + 10 \log \left( \frac{r}{r_0} \right)^{-2} = L(r_0) - 20 \log \frac{r}{r_0}$$

### 2.3 Distance Law

The distance  $r$  from the sound source also affects the sound level. In the case of a point source, the area of spherical sound propagation, with constant total energy, increases proportionally to  $r^2$ . Therefore, the intensity relative to a reference distance  $r_0$  decreases as follows:

$$I(r) = I(r_0) \frac{r_0^2}{r^2} \quad (15)$$

According to Equation (13), the corresponding sound level decreases with distance  $r$  as follows:

$$L(r) = L(r_0) - 20 \log \frac{r}{r_0} \quad (16)$$

In sound propagation, there is a small energy loss (dissipation) due to the internal friction of the air. This can be looked up in reference tables. Additionally, "ground absorption" should also be considered, which depends on the distance from the ground and the ground's characteristics. Dissipation and absorption make reproducible field measurements difficult and highly dependent on the measurement location and meteorological conditions.



## 2.4 Schallgeschwindigkeit

Die Schallwelle ist eine sich mit der **Phasengeschwindigkeit**  $v$  ausbreitende Abfolge von Druckschwankungen in einem Medium. Der Druck ist definiert als die pro Flächeneinheit senkrecht auf die Fläche wirkende Kraft (Einheit  $\text{N} \cdot \text{m}^{-2} = \text{Pa}$ ). Zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit in einem Gas betrachten wir ein Volumenelement  $V = A\Delta x$  (Fig. 2). Unter Gleichgewichtsbedingungen kompensieren sich die einander gegenüberliegenden Drücke (je  $p_0$ ). Eine in Richtung  $x$ -Achse laufende ebene Schallwelle entspricht einer fortlaufenden Änderung der Druckkräfte beidseits des Volumenelementes, so dass sich diese nicht mehr kompensieren, sondern eine resultierende Kraft entsteht. Diese Kraft bewirkt eine Beschleunigung und Kompression (oder Expansion) des Volumenelementes. Es seien  $s(x, t)$  die Verschiebung (Auslenkung) des Gases,  $u(x, t) = \frac{\partial s}{\partial t}$  dessen Geschwindigkeit, und  $p(x, t)$  der Druck als Funktion des Ortes entlang der  $x$ -Achse und der Zeit. Fig. 2 zeigt die räumliche Anordnung für einen festen Zeitpunkt.

Für hinreichend kleine Länge  $\Delta x$  des betrachteten Elementes kann die Druckdifferenz  $\Delta p$  zwischen den beiden Stirnflächen  $A$  durch den lokalen Druckgradienten beschrieben werden:  $\Delta p = \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x$ . Die resultierende, dem Druckgradienten entgegengesetzte Kraft  $\Delta F = -A\Delta p$  führt zu einer Beschleunigung  $a = \frac{\partial u}{\partial t}$  der Luftmasse  $m = \rho V = \rho A\Delta x$ , nach dem zweiten Newton'schen Gesetz ( $\Delta F = m \cdot a$ )

$$-A \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x = \rho A \Delta x \cdot \frac{\partial u(x)}{\partial t} \quad (17)$$

## 2.4 Speed of Sound

A sound wave is a sequence of pressure fluctuations propagating in a medium at a **phase velocity**  $v$ . Pressure is defined as the force per unit area acting perpendicular to the surface (unit  $\text{N} \cdot \text{m}^{-2} = \text{Pa}$ ). To calculate the speed of sound in a gas, we consider a volume element  $V = A\Delta x$  (Fig. 2). Under equilibrium conditions, the opposing pressures (each  $p_0$ ) cancel each other out. However, a plane sound wave traveling in the  $x$ -axis direction corresponds to a continuous change in pressure forces on both sides of the volume element, causing them no longer to cancel each other out. Instead, a resultant force arises. This force results in acceleration and compression (or expansion) of the volume element. Let  $s(x, t)$  be the displacement (deflection) of the gas,  $u(x, t) = \frac{\partial s}{\partial t}$  its velocity, and  $p(x, t)$  the pressure as a function of position along the  $x$ -axis and time. Fig. 2 shows the spatial arrangement for a fixed time point.

For a sufficiently small length  $\Delta x$  of the considered element, the pressure difference  $\Delta p$  between the two end faces  $A$  can be described by the local pressure gradient:  $\Delta p = \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x$ . The resulting force, opposite to the pressure gradient,  $\Delta F = -A\Delta p$ , leads to an acceleration  $a = \frac{\partial u}{\partial t}$  of the air mass  $m = \rho V = \rho A\Delta x$ , according to the second Newton's law ( $\Delta F = m \cdot a$ ):

$$-A \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x = \rho A \Delta x \cdot \frac{\partial u(x)}{\partial t} \quad (17)$$

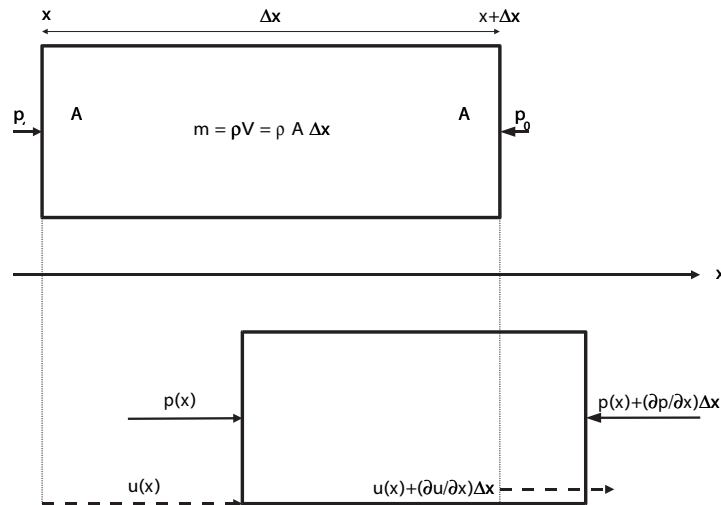


Fig. 2

Wobei  $\rho$  die mittlere<sup>2</sup> Dichte [ $kg \cdot m^{-3}$ ] ist. Somit folgt

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (18)$$

Aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeit der beiden Stirnflächen ändert sich das Volumen des betrachteten Elementes mit der Zeit. Analog zur Druckdifferenz ergibt sich die Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta u$  zwischen den beiden Stirnflächen zu  $\Delta u = \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x$  (Fig. 2). In der Zeit  $dt$  verändert sich daher das Volumen  $V = A \Delta x$  um den Betrag  $dV = A \Delta u dt = A \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x dt$ . Die relative Volumenänderung ist

$$\frac{dV}{V} = \frac{\partial u}{\partial x} dt \quad (19)$$

Jede Volumenänderung  $dV$  ist mit einer Druckänderung  $dp$  verbunden, wobei der Zusammenhang durch die Kompressibilität  $\kappa$  des Gases gegeben ist:

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (20)$$

Die Kombination von (19) und (20) ergibt:

<sup>2</sup>Eigentlich variiert auch die Dichte des Gases. In (17) kann die Dichteschwankung  $\Delta \rho$  aber in linearer Näherung vernachlässigt werden, weil das Produkt  $\Delta \rho \Delta x$  klein ist.

heat.

Where  $\rho$  is the average<sup>1</sup> density [ $kg \cdot m^{-3}$ ]. Therefore, we have

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (18)$$

Due to the different velocities of the two end faces, the volume of the considered element changes over time. Analogous to the pressure difference, the velocity difference  $\Delta u$  between the two end faces is  $\Delta u = \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x$  (Fig. 2). Therefore, in time  $dt$ , the volume  $V = A \Delta x$  changes by the amount  $dV = A \Delta u dt = A \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x dt$ . The relative change in volume is

$$\frac{dV}{V} = \frac{\partial u}{\partial x} dt \quad (19)$$

Every change in volume  $dV$  is associated with a change in pressure  $dp$ , and the relationship is governed by the compressibility  $\kappa$  of the gas:

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (20)$$

Combining (19) and (20) results in:

<sup>1</sup>In reality, the density of the gas also varies. However, in (17), the density fluctuation  $\Delta \rho$  can be neglected in a linear approximation because the product  $\Delta \rho \Delta x$  is small.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{\kappa} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (21)$$

Differenziert man nun die beiden Seiten der Gleichung (18) nach  $t$  und diejenigen der Gleichung (21) nach  $x$ , so erhält man in beiden Fällen auf der linken Seite den Term  $\frac{\partial^2 p}{\partial x \partial t}$ , und kann somit die rechten Seiten gleichsetzen:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho \kappa} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (22)$$

Das ist eine Wellengleichung (vgl. Versuch 4) für die Geschwindigkeit  $u(x, t)$  der Gasteilchen. Wegen  $u = \frac{\partial s}{\partial t}$  gilt die selbe Gleichung auch für die Auslenkung  $s(x, t)$ , wie man durch beidseitige Integration von (22) über  $t$  sofort zeigen kann.

Andererseits hätte man zuvor auch Gleichung (18) nach  $x$  und Gleichung (21) nach  $t$  ableiten können, wonach sich durch Gleichsetzen der Terme  $\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}$  die analoge Wellengleichung für den Druck ergibt:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho \kappa} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (23)$$

Die Lösungen der Gleichung (23) beschreiben Druckwellen, die sich mit der Fortpflanzungs- bzw. Phasengeschwindigkeit (siehe Versuch 4, Gl.(??))

$$v = \frac{1}{\sqrt{\rho \kappa}} \quad (24)$$

ausbreiten. Man beachte, dass die Phasengeschwindigkeit  $v$  der Welle nichts zu tun hat mit der Geschwindigkeit  $u$ , mit der die Gasteilchen schwingen. Im zeitlichen Mittel bleibt das Gas am Ort ( $\bar{u} = 0$ ), aber die Störung in der Druckverteilung pflanzt sich als Welle fort. Es findet also nur ein Energie- bzw. Impulsübertrag statt, kein Massetransport.

Soweit ist Gleichung (23) noch völlig allgemein; sie gilt für **Longitudinalwellen** (Wellen mit Amplituden in Ausbreitungsrichtung) in irgend einem Material. Wir wollen nun speziell die Verhältnisse im (idealen) Gas betrachten.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{\kappa} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (21)$$

Now, if we differentiate both sides of equation (18) with respect to  $t$  and both sides of equation (21) with respect to  $x$ , we obtain, in both cases, the term  $\frac{\partial^2 p}{\partial x \partial t}$  on the left-hand side. Thus, we can equate the right-hand sides:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho \kappa} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (22)$$

This is a wave equation (compare Experiment 4) for the velocity  $u(x, t)$  of the gas particles. Because  $u = \frac{\partial s}{\partial t}$ , the same equation also applies to the displacement  $s(x, t)$ , as can be immediately shown by integrating (22) over  $t$  on both sides.

On the other hand, one could have previously also differentiated equation (18) with respect to  $x$  and equation (21) with respect to  $t$ , resulting in equating the terms  $\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}$  in both cases, yielding the analogous wave equation for pressure:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho \kappa} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (23)$$

The solutions to equation (23) describe pressure waves that propagate at the propagation or phase velocity (see Experiment 4, Eq.(??))

$$v = \frac{1}{\sqrt{\rho \kappa}} \quad (24)$$

Notice that the phase velocity  $v$  of the wave has nothing to do with the velocity  $u$  at which the gas particles oscillate. In the temporal average, the gas remains at rest ( $\bar{u} = 0$ ), but the disturbance in the pressure distribution propagates as a wave. Therefore, only an energy or momentum transfer occurs, not mass transport.

So far, equation (23) is entirely general; it applies to **longitudinal waves** (waves with amplitudes in the direction of propagation) in any material. Now, we want to specifically examine the conditions in the (ideal) gas.

Man unterscheidet zwischen isothermer und adiabatischer Kompressibilität. Im ersten Fall bleibt während der Dichteänderung die Temperatur konstant (dafür findet ein Wärmeaustausch statt), im zweiten Fall findet kein Wärmeaustausch statt, dafür ändert sich die Temperatur. Bevor wir entscheiden, welche Kompressibilität, die isotherme  $\kappa_T$  oder die adiabatische  $\kappa_Q$  wir zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Gl. (24) einsetzen müssen, wollen wir die beiden Koeffizienten für das ideale Gas berechnen.

### 1. Isotherme Kompressibilität:

Das ideale Gasgesetz:

$$pV = RT = \text{const.}$$

für  $T = \text{const.}$

Benütze  $V = \frac{RT}{p}$  für die Berechnung von

$$\kappa_T = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = \frac{p}{RT} \frac{RT}{p^2} = \frac{1}{p} \quad (25)$$

$R$  universelle Gaskonstante  
(8.31441 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)

$T$  Temperatur [K]

One distinguishes between isothermal and adiabatic compressibility. In the first case, the temperature remains constant during changes in density (heat exchange occurs), while in the second case, no heat exchange occurs, but the temperature changes. Before deciding which compressibility, the isothermal  $\kappa_T$  or the adiabatic  $\kappa_Q$ , we need to use in the calculation of the speed of sound in Eq. (24), we want to calculate both coefficients for the ideal gas.

### 1. Isothermal Compressibility:

The ideal gas law:

$$pV = RT = \text{const.}$$

for  $T = \text{const.}$

Using  $V = \frac{RT}{p}$  for the calculation of

$$\kappa_T = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = \frac{p}{RT} \frac{RT}{p^2} = \frac{1}{p} \quad (25)$$

$R$  Universal gas constant  
(8.31441 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)

$T$  Temperature [K]

**2. Adiabatische Kompressibilität:**

Die adiabatische Zustandsgleichung (auch Poisson-Gleichung genannt):

$$pV^\gamma = k = \text{const.}$$

mit  $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$  als Adiabatenexponent<sup>3</sup>.

Benütze  $V = \left(\frac{k}{p}\right)^{\frac{1}{\gamma}}$  und berechne wie oben

$$k_Q = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_Q = \frac{1}{\gamma p} \quad (26)$$

Benützt man noch die für ideale Gase gültige Beziehung für die Dichte

$$\rho = \frac{M}{V} = M \frac{p}{RT}$$

$M$  Molmasse [ $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ]

so folgt aus Gl. (24) für die Schallgeschwindigkeit aus der isothermen Kompressibilität

$$v_T = \frac{1}{\sqrt{\rho \kappa_T}} = \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad (27)$$

bzw. aus der adiabatischen Kompressibilität

$$v_Q = \frac{1}{\sqrt{\rho \kappa_Q}} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad (28)$$

Man überlege sich anschaulich, welche der beiden Gl. (27) und (28) wohl die Realität besser beschreibt. Die Frage ist, ob bei Schallwellen zwischen den Orten mit erhöhtem bzw. erniedrigtem Druck ein Wärmeaustausch stattfindet (isotherm) oder nicht (adiabatisch). In diesem Versuch wird die Frage experimentell beantwortet.

<sup>3</sup> $C_p, C_V$ : Wärmekapazität [ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] bei konstantem Druck bzw. bei konstantem Volumen

**2. Adiabatic Compressibility:**

The adiabatic equation of state (also called the Poisson equation):

$$pV^\gamma = k = \text{const.}$$

with  $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$  as the adiabatic exponent<sup>2</sup>.

Using  $V = \left(\frac{k}{p}\right)^{\frac{1}{\gamma}}$  and calculate as above

$$k_Q = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_Q = \frac{1}{\gamma p} \quad (26)$$

If we also use the relationship for density valid for ideal gases:

$$\rho = \frac{M}{V} = M \frac{p}{RT}$$

$M$  Molar mass [ $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ]

then, from Eq. (24), for the speed of sound from isothermal compressibility, we get

$$v_T = \frac{1}{\sqrt{\rho \kappa_T}} = \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad (27)$$

and from adiabatic compressibility, we have

$$v_Q = \frac{1}{\sqrt{\rho \kappa_Q}} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad (28)$$

Consider intuitively which of the two equations (27) and (28) likely better describes reality. The question is whether heat exchange occurs (isothermal) or not (adiabatic) between locations with increased or decreased pressure during sound waves. This question is experimentally answered in this experiment.

<sup>2</sup> $C_p, C_V$ : Specific heat capacity [ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] at constant pressure and constant volume, respectively.

### 3 Aufgaben

1. Berechne für die 4 Lochreihen der Sirene die Grundfrequenzen.
2. Berechne und messe die Summe verschiedener Schallpegel und versuche den Unterschied zwischen Summe und Einzelton zu hören.
3. Überprüfe das Abstandsgesetz Gl. (16) bei hohen Frequenzen.
4. (*Optional*): Messen Sie Ihre eigene Hörempfindlichkeit und vergleichen Sie diese mit den Phonlinien in Fig. 3.
5. Messe mit dem Kundtschen Rohr die entsprechenden Wellenlängen  $\lambda$  und bestimme die Schallgeschwindigkeit  $v$ . Schätze die Ungenauigkeit der Bestimmung von  $f$  und  $\lambda$  ab und berechne daraus den Fehler der einzelnen Werte für  $v$ . Vergleiche dies mit der Streuung der Einzelresultate um den Mittelwert  $\bar{v}$ .
6. Messe die Raumtemperatur und vergleiche die unter 1 bestimmte Schallgeschwindigkeit mit den theoretischen Formeln (27) und (28). Welche Formel passt besser und weshalb?

### 4 Durchführung der Versuche

1. *Grundfrequenzen der Sirene*: Die Sirene besteht aus einer Plexiglasscheibe, auf der in unterschiedlichen Abständen vom Zentrum vier kreisförmige Lochreihen angeordnet sind. Mit einem Elektromotor wird die Scheibe in Rotation gebracht. Mit einer Düse wird - je nach Wahl - in eine der Lochreihen Luft eingeblasen.

### 3 Tasks

1. Calculate the fundamental frequencies for the 4 rows of holes in the siren.
2. Calculate and measure the sum of various sound levels and attempt to hear the difference between the sum and the individual tone.
3. Verify the distance law Eq. (16) at high frequencies.
4. (*Optional*): Measure your own hearing sensitivity and compare it with the Phon curves in Figure 3.
5. Measure the corresponding wavelengths  $\lambda$  using the Kundt's tube and determine the speed of sound  $v$ . Estimate the uncertainty in determining  $f$  and  $\lambda$  and calculate the error in individual values for  $v$ . Compare this with the spread of individual results around the mean  $\bar{v}$ .
6. Measure the room temperature and compare the speed of sound determined under 1 with the theoretical formulas (27) and (28). Which formula fits better and why?

### 4 Conducting the Experiments

1. *Fundamental frequencies of the siren*. The siren consists of a Plexiglas disc with four circular rows of holes arranged at different distances from the center. An electric motor rotates the disc. Using a nozzle, air is blown into one of the rows of holes, depending on your choice. The fundamental frequency of the corre-

Aus der Drehzahl des Motors und der Anzahl Löcher pro Umlauf kann die Grundfrequenz des entsprechenden Tones ermittelt werden ( $f = \text{Tourenzahl} \cdot \text{Anzahl Löcher}$ ).

Bei der Arbeit mit der Sirene ist es empfehlenswert, den Gehörschutz zu tragen!

2. *Messen mit dem Schallpegelmessgerät:* Für die Messungen der Aufgaben 1 und 2 wird der Drucklautsprecher aus dem Kundtschen Rohr entfernt und ebenso wie das Schallpegelmessgerät auf einer Schiene montiert.

Der Schallpegel wird mit dem integrierenden Digital-Schallpegelmessgerät CEL-269 bestimmt (Fig. 5). Studiere zuerst die Gerätebeschreibung und eiche den CEL-269 mit dem Acoustical Calibrator CEL-284. Die Eichung erfolgt im Betriebsmodus "SPL", die Messungen zu meist im Modus "LEQ", wobei jeweils vor Messbeginn die Mittelung zurückgesetzt werden soll (Reset).

Stelle am Frequenzgenerator die Lautstärke bei einer bestimmten Frequenz so ein, dass der Schallpegelmessgerät mit A-Filter 80 dB anzeigt. Schalte den A-Filter ab (d.h. wechsele auf die passende C-Einstellung) und trage den "linearen" Schallpegel auf dem Phon-Diagramm ein (Rückseite des Messprotokolls). Wiederhole den Vorgang für alle angegebenen Frequenzen<sup>4</sup>. Die entstehende Kurve sollte ungefähr der 80-Phonkurve folgen; Abweichungen zeigen den Unterschied zwischen dem A-Filter und der Empfindlichkeit des menschlichen Ohrs.

Die Schallpegelmessung ist recht heikel, da der Raum und die sich in ihm befind-

sponding tone can be determined from the motor's rotation speed and the number of holes per revolution ( $f = \text{speed of rotation} \cdot \text{number of holes}$ ).

It is recommended to wear hearing protection when working with the siren!

2. *Measurement with the Sound Level Meter:* For the measurements in Tasks 3 and 4, remove the pressure loudspeaker from the Kundt's tube and mount it, as well as the sound level meter, on a rail.

Determine the sound level using the integrating digital sound level meter CEL-269 (Fig. 5). First, study the device's description and calibrate the CEL-269 with the Acoustical Calibrator CEL-284. Calibration is done in "SSPL" mode, and measurements are usually made in "LEQ" mode, with the averaging reset before each measurement (Reset).

Set the volume on the frequency generator to a level where the sound level meter with an A-filter displays 80 dB. Turn off the A-filter (i.e., switch to the appropriate C-setting) and plot the "linear bound level on the Phon diagram (backside of the measurement protocol). Repeat the process for all specified frequencies<sup>3</sup>. The resulting curve should roughly follow the 80-Phon curve; deviations show the difference between the A-filter and the sensitivity of the human ear.

Sound level measurement is quite delicate because the room and objects in it can influence the level. If the person taking measurements changes location during the measurement, level changes can be observed. To keep the error small, it is

<sup>4</sup>Für jede neue Frequenz muss die Lautstärke wieder so eingestellt werden, dass das Messgerät mit A-Filter 80 dB anzeigt.

<sup>3</sup>For each new frequency, adjust the volume so that the meter with an A-filter displays 80 dB.



- lichen Gegenstände den Pegel beeinflussen. Wenn die messende Person während der Messung den Standort wechselt, so sind Pegeländerungen feststellbar. Um den Fehler gering zu halten, ist es sinnvoll, das Schallpegelmessgerät fest und nahe an den Drucklautsprecher zu montieren und soweit möglich nicht die eigene Position zu ändern.
3. *Überprüfung des Abstandsgesetzes:* Überprüfe die Gültigkeit der Gl. (16) mit Hilfe des Tongenerators, des Drucklautsprechers und des Schallpegelmessgerätes. Durch Verschieben des auf der Schiene montierten Messgerätes gegenüber dem Lautsprecher können verschiedene Abstände eingestellt werden. Um Interferenzen durch reflektierte Wellen zu vermeiden, sind kurze Wellen (sehr hohe Frequenzen) zu benutzen und die Messungen auf einen maximalen Abstand von ca. 20 cm zu beschränken. Beachte: der kleinste Messabstand vor der Schallquelle sollte nicht kleiner als die lineare Ausdehnung der Quelle sein. Wieso?
  4. *Schallpegeladdition:* Mit der Lochsirene hat man die Möglichkeit, verschiedene Schallpegel gleichzeitig zu messen. Mit Hilfe einer zweiten, auf die gleiche Lochreihe der Sirene wirkenden Luftdüse, kann die Schallintensität verdoppelt werden. Messe den entsprechenden Anstieg des Schallpegels und vergleiche die Messung mit dem theoretisch erwarteten Wert (aus Gl. (13)). Notiere den subjektiven Lautstärke-Unterschied mit und ohne Gehörschutz. Führe auf gleiche Art drei weitere sinnvolle Summationen mit mehreren Luftdüsen durch.  
  
Es empfiehlt sich, das Schallpegelmessgerät für alle Messungen an einem festen Ort vor der Lochsirene zu platzieren.
- advisable to firmly mount the sound level meter near the pressure loudspeaker for all measurements.
3. *Verification of the Distance Law:* Verify the validity of Eq. (16) using the tone generator, the pressure loudspeaker, and the sound level meter. By moving the measurement device mounted on the rail relative to the loudspeaker, different distances can be set. To avoid interference from reflected waves, use short waves (very high frequencies) and limit the measurements to a maximum distance of about 20 cm. Note: The smallest measurement distance in front of the sound source should not be smaller than the linear dimension of the source. Why?
  4. *Sound Level Addition:* With the siren, you have the opportunity to measure multiple sound levels simultaneously. Using a second air nozzle acting on the same row of holes in the siren, the sound intensity can be doubled. Measure the corresponding increase in sound level and compare the measurement with the theoretically expected value (from Eq. (13)). Record the subjective difference in volume with and without hearing protection. Repeat three other meaningful summations with multiple air nozzles.  
  
It is recommended to place the sound level meter in a fixed location in front of the siren for all measurements.
  5. *Measuring the Speed of Sound:* Use the four frequency or the siren for your speed of sound measurement. For the coarse adjustment, rely on the generator's display, then fine-tune by ear. The sinusoidal waveform generated by the frequency generator (ensure correct settings on the device) is transmitted to the large louds-

5. *Messen der Schallgeschwindigkeit:* Die von der Sirene vorgegebenen definierte Frequenz soll nun am Frequenzgenerator eingestellt werden. Dabei verlässt man sich nur für die grobe Einstellung auf die Anzeige des Generators, die Feinabstimmung erfolgt mit dem Gehör. Die vom Frequenzgenerator erzeugte sinusförmige Schwingung (auf richtige Einstellung am Gerät achten) wird auf die grossen Lautsprecher übertragen. Danach stimmt man die Frequenz ab, bis kein Unterschied der Tonhöhen von Sirene und Generator mehr hörbar ist. Der kleinste für Menschen wahrnehmbare relative Frequenzunterschied  $\frac{\Delta f}{f}$  zwischen 2 reinen Tönen liegt bei etwa 0.6%. Dies entspricht nur rund einem Zehntel eines Halbtonintervalles (Eine Oktave entspricht 12 Halbtönen und einer Frequenzverdoppelung,  $\frac{1}{10}$  eines Halbtonintervalles entspricht somit einem Frequenzverhältnis von  $^{120}\sqrt{2} = 1.006$ ). Es wird den Praktikanten überlassen, abzuschätzen, wie nah sie an diese Grenze herankommen! Eine Kontrolle der effektiven Genauigkeit der Frequenzeinstellung ergibt sich im Nachhinein aus der Streuung der Resultate wiederholter Messungen.

Nach erfolgter Abstimmung wird das Signal des Tongenerators über den Verstärker auf den am Kundtschen Rohr angebrachten Drucklautsprecher gegeben, wodurch im Rohr eine stehende Welle angeregt wird. Mit einem verschiebbaren Stöpsel kann die Länge des Kundtschen Rohres so eingestellt werden, dass Resonanz eintritt (vgl. Versuch 5). Dies ist dann der Fall, wenn die Länge des Resonators gerade ein Vielfaches der halben Wellenlänge beträgt (vgl. Versuch 4). Nur dann kann sich die stehende Welle maximal ausbilden und das feine Kork-

peakers. Adjust the frequency until there is no audible difference in pitch between the siren and the generator. The smallest relative frequency difference  $\frac{\Delta f}{f}$  that is perceivable by humans between two pure tones is about 0.6%. This corresponds to only about one-tenth of a half-tone interval (an octave consists of 12 half-tones and a doubling of frequency, so  $\frac{1}{10}$  of a half-tone interval corresponds to a frequency ratio of  $^{1/120}\sqrt{2} = 1.006$ ). It is up to the students to estimate how close they can come to this limit! The actual accuracy of the frequency setting can be determined afterward from the spread of results from repeated measurements.

Attache the tone generator to the loudspeaker for the Kundt's tube. The sound will excite a standing wave in the tube. Using a movable plug, the length of the Kundt's tube is adjusted to achieve resonance (see Experiment 5). This occurs when the length of the resonator is exactly a multiple of half-wavelength (see Experiment 4). Only in this case can the standing wave fully develop, and the fine cork powder inside the tube begins to vibrate, making the wave structure (antinodes and nodes) directly visible. The cork powder is agitated at the antinodes of the velocity distribution and collects at the nodes<sup>4</sup>. The distance from node to node or antinode to antinode corresponds exactly to half the wavelength. From this, the wavelength and the speed of sound,

<sup>4</sup>The larger accumulations of cork powder should be observed, not the thin ribbons formed by the dust particles in between. The origin and behavior of these ribbons are not fully understood to this day. The shape and spacing of the ribbons depend on the amplitude and frequency of the standing wave in the tube. The position of the ribbons is generally not fixed, so you can observe some of them oscillating around their equilibrium position or starting to move.

pulver im Rohr beginnt zu schwingen, wodurch die Wellenstruktur (Wellenbäuche und Wellenknoten) direkt sichtbar wird. Bei den Bäuchen der Geschwindigkeitsverteilung wird das Pulver aufgewirbelt, bei den Knoten bleibt es liegen und sammelt sich an<sup>5</sup>. Der Abstand von Knoten zu Knoten bzw. von Bauch zu Bauch entspricht gerade der halben Wellenlänge. Daraus können Wellenlänge und Schallgeschwindigkeit Gl.(5) bestimmt werden. Man überlege sich, wie die Genauigkeit der Messung der Wellenlänge optimiert werden kann.

**Vorsicht** Das Rohr mit Korkpulver lädt sich leicht elektrostatisch auf. Deshalb möglichst wenig berühren!

**Hinweise** Bei der höchsten der vier Frequenzen ist es nicht mehr möglich, die Schallwellen im Rohr zu sehen. Man überlege sich, wie man mithilfe der Lautstärke trotzdem die Schwingung ausmessen kann.

6. *Berechnung der Schallgeschwindigkeit:* Die Lufttemperatur wird mit einem einfachen Raumthermometer gemessen. Die Molmasse der Luft erhält man aus den Molmassen der Elemente Stickstoff und Sauerstoff ( $M_N = 14 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,  $M_O = 16 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ), sowie den bekannten Anteilen der entsprechenden Moleküle in

Eq. (5), can be determined. Think about how to optimize the accuracy of the wavelength measurement.

**Caution:** The tube with cork powder easily becomes electrostatically charged. Therefore, touch it as little as possible!

**Note:** At the highest of the four frequencies, it is no longer possible to see the sound waves in the tube. Think about how to measure the vibration despite this using the volume.

6. *Calculating the Speed of Sound:* Measure the room temperature using a simple room thermometer. The molar mass of air can be calculated from the molar masses of the elements nitrogen and oxygen ( $M_N = 14 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,  $M_O = 16 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ), as well as the known proportions of these molecules in the air (80%  $N_2$ , 20%  $O_2$ ). The adiabatic index  $\gamma_{Air}$  is 1.40 (derived from thermodynamics due to the fact that air consists mainly of diatomic molecules).

Use equations (27) and (28) to calculate the speed of sound and compare the result with the first task. Estimate the errors for both methods and determine whether there is agreement within the errors. Which formula is better, and why?

<sup>5</sup>Es sind die grösseren Anhäufungen von Korkpulver zu betrachten, nicht die dazwischen auftretenden Rippen aus dünnen Wänden von Staubkörnern. Ursprung und Verhalten dieser Rippen sind bis heute nicht vollständig geklärt. Die Form und der Abstand der Rippen untereinander hängen von der Amplitude und der Frequenz der stehenden Welle im Rohr ab. Der Ort der Rippen ist im Allgemeinen nicht fest, so dass man beobachten kann, wie einige um ihre Gleichgewichtslage schwingen oder zu wandern beginnen.

der Luft (80%  $N_2$ , 20%  $O_2$ ). Der Adiabatenexponent  $\gamma_{Luft}$  beträgt 1.40 (das folgt aus der Thermodynamik aufgrund der Tatsache, dass Luft hauptsächlich aus zweiatomigen Molekülen besteht).

Benütze die Gleichungen (27) und (28) für die Berechnung der Schallgeschwindigkeit und vergleiche das Resultat mit der ersten Aufgabe. Schätze für beide Methoden die Fehler ab und stelle fest, ob innerhalb der Fehler Übereinstimmung besteht. Welche Formel ist besser und wieso?

## 5 Schallpegelmessgerät CEL-269

### Schiebeschalter

**OFF - F - S - I** (Zeitauflösung)

OFF	Schaltet das Gerät ab
F	Fast, Schalländerungen von 125 Millisekunden (ms)
S	Slow, Schalländerungen von 1 Sekunde
I	Impuls, Knall mit mehr als 35 ms Anstieg und 1500 ms Abfall

**A HI - A LO - C LO - C HI** (Frequenzfilter, Pegelbereich)

A HI	Frequenzgewichtung nach A-Kurve, hohe Pegel (65 – 135 dB)
A LO	Frequenzgewichtung nach A-Kurve, tiefe Pegel (30 – 100 dB)
C HI	Linear (ohne Frequenzgewichtung), hohe Pegel (65 – 135 dB)
C LO	Linear (ohne Frequenzgewichtung), i tiefe Pegel (30 – 100 dB)

*Bemerkung:* Eigentlich entsprechen die C-Einstellungen einem weiteren Frequenzfilter,

## 5 Sound Level Meter CEL-269

### Slide Switch

**OFF - F - S - I** (Time Resolution)

OFF	Turns off the device
F	Fast, Sound changes every 125 milliseconds (ms)
S	Slow, Sound changes every 1 second
I	Impulse, Sound with more than 35 ms rise and 1500 ms fall

**A HI - A LO - C LO - C HI** (Frequency Filter, Level Range)

A HI	Frequency weighting according to A-curve, high levels (65 – 135 dB)
A LO	Frequency weighting according to A-curve, low levels (30 – 100 dB)
C HI	Linear (no frequency weighting), high levels (65 – 135 dB)
C LO	Linear (no frequency weighting), low levels (30 – 100 dB)

*Note:* The C settings actually correspond to another frequency filter that has been bypassed to obtain the linear sound level.

der aber überbrückt wurde, um den linearen Schallpegel zu erhalten.

### Betriebsarten (Mode)

In der Flüssigkristallanzeige erscheint links die Betriebsart, rechts in grossen Zahlen der Wert, welcher aus dem jeweiligen Betriebsmodus resultiert. Mit dem "Mode"-Knopf kann die Betriebsart gewechselt werden ohne die Messung zu stören. Liste der Betriebsarten:

- **SPL** momentaner Schalldruckpegel, alle 0.5 s aktualisiert (default)
- **MAX** Höchstwert-Haltefunktion: Maximaler Schallpegel einer Messung wird festgehalten
- **LEQ** Äquivalenter Dauerschallpegel, d.h. zeitlich gemittelter Schallpegel
- **BAT** Batteriespannung; diese sollte grösser als 3.2 V sein

### Reset

Nur die angezeigte Funktion wird zurückgestellt.

### Allgemeines Reset

Alle Funktionen werden zurückgesetzt, sobald eine Schiebeschalter-Position von Zeitauflösung (F-S-I) oder Frequenzfilter / Messbereich (A HI - A LO - C LO - C HI) geändert wird.

### Eichen des Schallpegelmessgeräts

Mikrofon-Schutzhaube entfernen und das Mikrofon in die schwarze Öffnung des Acoustical Calibrator CEL-284 stecken. Das Schallpegelmessgerät CEL-269 mit der Einstellung A HI, F, und SPL muss 114 dB anzeigen, andernfalls kann im Loch CAL über ein Potentiometer

### Operating Modes (Mode)

The operating mode appears on the liquid crystal display on the left, and the value resulting from the respective operating mode appears on the right in large numbers. The "Mode" button can be used to change the operating mode without disturbing the measurement. List of operating modes:

- **SPL** Instantaneous sound pressure level, updated every 0.5 seconds (default)
- **MAX** Maximum hold function: Maximum sound level of a measurement is retained
- **LEQ** Equivalent continuous sound level, i.e., time-averaged sound level
- **BAT** Battery voltage; it should be greater than 3.2 V

### Reset

Only the displayed function is reset.

### General Reset

All functions are reset when a slide switch position of time resolution (F-S-I) or frequency filter / range (A HI - A LO - C LO - C HI) is changed.

### Calibrating the Sound Level Meter

Remove the microphone protective cover and insert the microphone into the black opening of the Acoustical Calibrator CEL-284. The sound level meter CEL-269 with the setting A HI, F, and SPL should display 114 dB, otherwise, you can adjust it to 114 dB using the potentiometer in the CAL hole with the included screwdriver.

mit dem beigelegten Schraubenzieher auf 114  
dB korrigiert werden.

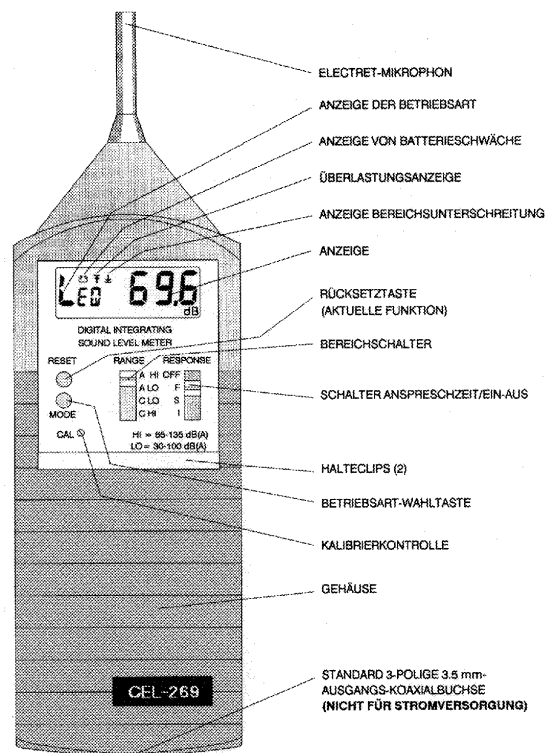


Fig. 5