

# 54 Schallwellen und Lärm

---

## 54 Sound waves and noise

### 1 Grundlagen

***Hinweis:** Die Abschnitte Einleitung und Das Gehör geben Hintergrundinformationen. Sie sind für die Durchführung nicht wesentlich und können übersprungen werden.*

#### 1.1 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 schließen 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 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,

### 1 Basics

***Note:** The following sections and the section about the human ear were translated using Google Translate. It provides some general background information which is not needed for the experiment. For a more detailed description of the human ear see <https://en.wikipedia.org/wiki/Ear>*

#### 1.1 Background

The German word for noise “Lärm” derives from the Old-German word “Alerm”, originating from the Italian “all’arme” and “to the arms”. This alarm message is intended for the hearing and used to warn. The hearing cannot be closed or turn off, which of course is quite useful for a warning system. During sleep, noise can be considerably disturbing. In a noisy environment one does not feel rested even after a long sleep. Is the sleep disorder even stronger (shrill alarm), so you react immediately to this Alarm and scares.

*Noise is extremely annoying and is always caused by others!*

In today’s cities the mean sound intensity is about 1000 sometimes higher than in nature, to which our ear is adapted. Thereby constantly false alarms are generated, which are displaced and so the psyche over time. It is quite difficult to show that such medium level noise

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.

## 1.2 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 Welle 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

causes health cause of health damage medically demonstrated. In addition, it is important whether the acoustic effect Information for the harassed person or not (e.g., a Conversation, a whimpering child, music, etc.). According to the information content is also the reaction. For example, a piece of music can be someone so severely that he simultaneously no other activity and perceive this piece as a noise. For another Person acts the same piece of music stimulating, so certainly not as noise.

In fact, disturbing acoustic signals can be heard at medium volume not in a simple way. It is undisputed, however, that the noise is a **mental disorder**, which over longer periods Time health and well-being, but rarely as (co-) Cause of this fault is detected. Volume near the pain threshold lead to unambiguous health problems. Investigations on the Sleep show that even small and medium-sized sounds too medically detectable damage. One thinks once, which sounds most disturb how loud they are and where they come from. Finding one surely a large spread of the volume.

## 1.2 The Human Ear

The ear can detect very small pressure fluctuations in the air (sound waves) with frequencies from about 16 to 16000 Hz (1 Hz = 1 oscillation per second). A cut through the human ear (Fig. 1) shows the path of a sound from the outer ear arrival of the sound wave on the earpiece until the transmission of the stimulus to the nerve cells.

The incoming wave is received by the auricle 1, through the ear canal 2, and strikes the eardrum 3 (strong Damping). This absorbs the vibration and gives it mechanically via the auditory ossicles 4 (hammer, anvil and stirrups) to the oval Window 5. Small pressure fluctuations of the light Air to continuous waves in the medium of the screw fluid a thousand times heavier converted. If the sound wave were applied directly to the oval window 5, then only a thousandth of the already small energy would of the sound wave and reflect the rest. The bony, Worm-like shape 6 with three turns contains two channels. The shaft runs through the screw of the screw from the oval window the "first" channel (Vorhofstreppe) and transmits the sense organs over fine hair the acoustic information. At the narrow end the wave in the "second" channel (parabolic stage) and runs in parallel back to the round window 7, where it is destroyed (strong damping).

“zweiten” Kanal (Paukentreppe) und läuft parallel zurück zum runden Fenster 7, wo sie vernichtet wird (starke Dämpfung).

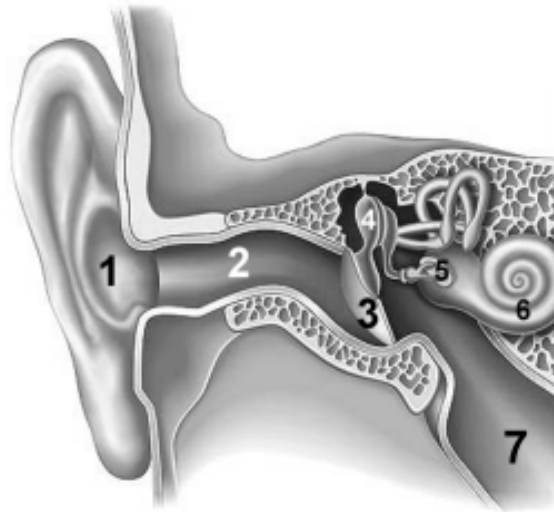


Fig. 1

## 2 Theorie

### 2.1 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

## 2 Theory

### 2.1 Speed of Sound

A sound wave is a ondulation of fluctuating pressure travelling through a medium with a speed  $v$ . Pressure is defined as the force be unit area acting perpendicular to an surface (units:  $\text{N}/\text{m}^2 = \text{Pa}$ ).

To calculate the speed of sound in a gas like air we consider a small box  $V = A\Delta x$  (Fig. 2), were  $A$  and  $\Delta x$  are the area of one side and the length of the box perpendicular to this side, respectively. At equilibrium the pressure  $p$  on the areas  $A$  at  $x$  and  $x + \Delta x$  must match ( $p(x) = p(x + \Delta x) = p_0$ ). A sound wave traveling along the  $x$ -direction will change the pressure impinging on the box and the resulting force will lead movements of the medium. Let  $s(x, t)$  and  $u(x, t) = \partial s / \partial t$  and  $a = \partial u / \partial t$  denote the displacement, velocity

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 ( $\Delta F = m \cdot a$ )

$$-A \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x = \rho A \Delta x \cdot \frac{\partial u(x)}{\partial t} \quad (1)$$

and acceleration of the medium at position  $x$  and time  $t$ .

For a sufficiently small  $\Delta x$  the pressure difference between the sides of the box can be approximated by  $\Delta p = \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x$ . This results in a force  $F = -A \Delta p$  acting on medium which will lead to an acceleration (Newton's Law  $F = ma$ )

$$-A \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x = \rho A \Delta x \cdot \frac{\partial u(x)}{\partial t} \quad (1)$$

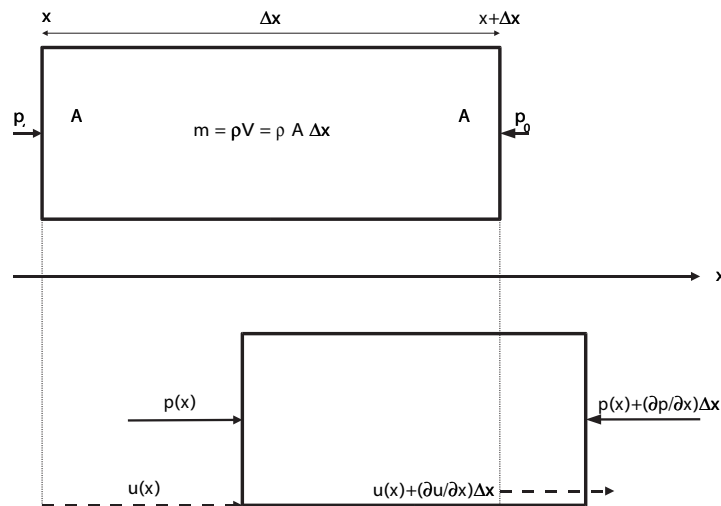


Fig. 2

Wobei  $\rho$  die mittlere<sup>1</sup> Dichte [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] ist. Somit folgt

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

where  $\rho$  denotes the density of the medium [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]. It follows

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

<sup>1</sup>Eigentlich variiert auch die Dichte des Gases. In (1) kann die Dichteschwankung  $\Delta \rho$  aber in linearer Näherung vernachlässigt werden, weil das Produkt  $\Delta \rho \Delta x$  klein ist.

Simultaneously the volume of the box will change due to the different velocities at the two sides. Analogously to the pressure difference the velocity difference for sufficiently

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

$$\frac{dV}{V} = \frac{\partial u}{\partial x} dt \quad (3)$$

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

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (4)$$

Die Kombination von (3) und (4) ergibt:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{\kappa} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (5)$$

Differenziert man nun die beiden Seiten der Gleichung (2) nach  $t$  und diejenigen der Gleichung (5) 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:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho \kappa} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (6)$$

Das ist eine Wellengleichung (vgl. Versuch 4) für die Geschwindigkeit  $u(x, t)$  der Gaspartikel. Wegen  $u = \frac{\partial s}{\partial t}$  gilt die selbe Gleichung auch für die Auslenkung  $s(x, t)$ , wie man durch beidseitige Integration von (6) über  $t$  sofort zeigen kann.

Andererseits hätte man zuvor auch Gleichung (2) nach  $x$  und Gleichung (5) 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:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho \kappa} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (7)$$

small  $\Delta x$  is  $\Delta u = \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x$  (Fig. 2). Within a small time span  $dt$  the volume  $V = A\Delta x$  will change by  $dV = A\Delta u dt = A \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x dt$ . Hence the relative volume change is

$$\frac{dV}{V} = \frac{\partial u}{\partial x} dt \quad (3)$$

Any volume change  $dV$  results in a pressure change  $dp$  according to the compressibility  $\kappa$  of the medium:

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (4)$$

Combining (3) with (4) leads to :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{\kappa} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (5)$$

Differentiation (2) by  $t$  and (5) by  $x$ , results in  $\frac{\partial^2 p}{\partial x \partial t}$ , on the left hand side of both equation which implies that the right hand sides must balance:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho \kappa} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (6)$$

This is a wave equation (see experiment 4) for the velocities  $u$  in the medium.

Analogously one can derive a wave equation for pressure by differentiating (2) by  $x$  and (5) by  $t$ :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho \kappa} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (7)$$

The solution of (7) describes pressure waves travelling with the velocity

$$v = \frac{1}{\sqrt{\rho \kappa}} \quad (8)$$

Note that this velocity  $v$  is unrelated to the velocity  $u$  of the particles in the medium. In temporal mean the medium remains at fixed ( $\bar{u} = 0$ ), but the disturbance travels as a wave through the medium. Only energy and impulse is transported but no mass.

Up until now (7) is general; it is valid for a pressure wave (a longitudinal wave) in any

Die Lösungen der Gleichung (7) beschreiben Druckwellen, die sich mit der Fortpflanzungs- bzw. Phasengeschwindigkeit (siehe Versuch 4, Gl.(??))

$$v = \frac{1}{\sqrt{\rho\kappa}} \quad (8)$$

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 (7) 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.

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. (8) 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

$$\kappa_T = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = \frac{p}{RT} \frac{RT}{p^2} = \frac{1}{p} \quad (9)$$

material. Now consider the circumstances in an (ideal) gas.

For a gas one distinguishes between isothermal and adiabatic compressibility. The former is the compressibility by fixed temperature while the latter assumes no exchange of heat.

In the experiment we will try to determine if of these assumptions is more appropriate for sound waves. To this end we derive the speed of sound twice first assuming isothermal conditions and a second time assuming adiabatic conditions.

### 1. Isothermal compressibility:

Ideal gas law:

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

for  $T = \text{const.}$

Using  $V = \frac{RT}{p}$  one derives

$$\kappa_T = -\frac{1}{V} \left. \frac{\partial V}{\partial p} \right|_T = \frac{p}{RT} \frac{RT}{p^2} = \frac{1}{p} \quad (9)$$

with

$R$  universelle Gaskonstante  
( $8.31441 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )  
 $T$  Temperatur [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>2</sup>.

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

$$k_Q = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_Q = \frac{1}{\gamma p} \quad (10)$$

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. (8) für die Schallgeschwindigkeit aus der isothermen Kompressibilität

$$v_T = \frac{1}{\sqrt{\rho \kappa_T}} = \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad (11)$$

bzw. aus der adiabatischen Kompressibilität

$$v_Q = \frac{1}{\sqrt{\rho \kappa_Q}} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad (12)$$

Man überlege sich anschaulich, welche der beiden Gl. (11) und (12) 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>2</sup> $C_p, C_V$ : Wärmekapazität [ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] bei konstantem Druck bzw. bei konstantem Volumen

$R$  Gas constant ( $8.31441 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )  
 $T$  Temperature [K]

## 2. Adiabatic compressibility:

Adiabatic law (Poisson equation):

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

with  $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$  Adiabatic exponent<sup>1</sup>.

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

$$k_Q = -\frac{1}{V} \left. \frac{\partial V}{\partial p} \right|_Q = \frac{1}{\gamma p} \quad (10)$$

with the ideal gas law

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

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

Using (8) leads to a speed of sound with isothermal compressibility of

$$v_T = \frac{1}{\sqrt{\rho \kappa_T}} = \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad (11)$$

whereas assuming an adiabatic compressibility results in

$$v_Q = \frac{1}{\sqrt{\rho \kappa_Q}} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad (12)$$

Which of these two equation (11) and (12) is more suitable for sound waves depends on whether temperature within the liquid remains constant while a sound wave is passing through it (isothermal conditions) or there is now heat exchange between the high and low pressure regions of the sound wave (adiabatic conditions). You are encouraged to guess which condition is more appropriate. If succeeded in taking your measurements of the speed with high enough accuracy, you will be able to determine which model is more adequate.

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



## 2.2 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:

$$I = Ev \quad (13)$$

Die Wellenenergie ist auf zwei Arten gespeichert, als kinetische Energie  $E_{kin}$  (Bewegung der Luftmoleküle), und als potentielle Energie  $E_{pot}$  (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  $E_{kin}$  und  $E_{pot}$  aufteilt:

$$\overline{E_{kin}} = \overline{E_{pot}} = \frac{1}{2} \overline{E} \quad (14)$$

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

$$\overline{E_{kin}} = \frac{1}{2} \rho \overline{u^2} \quad (15)$$

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

$$u(x, t) = u_1 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft\right) \quad (16)$$

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

$$v = f\lambda \quad (17)$$

zusammen. Für Schallmessungen ist es praktischer, an Stelle der in Gl. (16) auftretenden Schwingungsamplitude  $u_1$  die Druckamplitude  $p_1$  zu bestimmen. Wir setzen für den Druck ebenfalls eine harmonische Welle an:

$$p(x, t) = p_1 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft\right) \quad (18)$$

## 2.2 Sound Intensity

The sound intensity  $I$ , is a measures for the strength of sound. It is defined as the Energy per area passing through an area perpendicular to said area (units:  $\text{W/m}^2$ ). For plane waves is is the product of the energy  $E$  (units:  $\text{J/m}^3$ ) per volume of the wave multiplied by its velocity  $v$ :

$$I = Ev \quad (13)$$

The wave energy is stored in two forms, kinetic Energy  $E_k$  (motion of the air molecules) and potential Energy  $E_p$  (pressure disturbance). There is a continuous exchange in space and time of these energy forms. Wave theory shows that on average both energy forms store an equal amount of energy:

$$\overline{E_k} = \overline{E_p} = \frac{1}{2} \overline{E} \quad (14)$$

To calculate the total intensity we use the kinetic Energy.

$$\overline{E_k} = \frac{1}{2} \rho \overline{u^2} \quad (15)$$

To this end we use a harmonic wave for  $u(x, t)$

$$u(x, t) = u_1 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft\right) \quad (16)$$

where  $\lambda$  and  $f$  are the wave length and frequency, respectively.

$$v = f\lambda \quad (17)$$

For sound measurements it is more convenient to determine the pressure amplitude  $p_1$  instead of the velocity amplitude  $u_1$  of (16). Let us also assume a harmonic wave for the pressure field:

$$p(x, t) = p_1 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi ft\right) \quad (18)$$



Gl.(2) stellt einen Zusammenhang zwischen den Ableitungen der beiden Wellen (16) und (18) her, den wir benützen, um die Amplituden zu verknüpfen. Mit

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -2\pi f u_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi f t\right) \quad (19)$$

und

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{2\pi}{\lambda} p_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi f t\right) \quad (20)$$

sowie den Gleichungen (2) und (17) folgt:

$$u_1 = \frac{p_1}{v\rho} \quad (21)$$

Einsetzen in Gl.(16) ergibt für das Quadrat der Geschwindigkeit:

$$u^2 = \frac{p_1^2}{v^2 \rho^2} \sin^2\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi f t\right) \quad (22)$$

Die Mittelung von (22) über viele Schwingungsperioden ergibt mit  $\overline{\sin^2 y} = \frac{1}{2}$ :

$$\overline{u^2} = \frac{p_1^2}{2v^2 \rho^2} \quad (23)$$

Einsetzen in Gl.(15) und (13) liefert schliesslich:

$$I = \overline{E}v = 2\overline{E_{kin}}v = \frac{p_1^2}{2v\rho} \quad (24)$$

Atmosphärendruck	$10^5$ Pa
Druckunterschied bei Kniebeuge ( $\Delta h = 0.5$ m)	5 Pa
Gespräch	0.05 Pa
Hörbereich – Druck	$20 \cdot 10^{-6}$ Pa – 20 Pa
Hörbereich – Intensität	$10^{-12}$ Wm $^{-2}$ – $10$ Wm $^{-2}$

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.

Gl.(2) gives a relationship between the derivatives of  $u$  and  $p$  which implies to relationship of the amplitudes. With

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -2\pi f u_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi f t\right) \quad (19)$$

and

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{2\pi}{\lambda} p_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi f t\right) \quad (20)$$

as well as (2) and (17) follows:

$$u_1 = \frac{p_1}{v\rho} \quad (21)$$

Inserting this in (16) gives for the square of the velocities  $u$ :

$$u^2 = \frac{p_1^2}{v^2 \rho^2} \sin^2\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi f t\right) \quad (22)$$

Averaging (22) a oscillation lead gives  $\overline{\sin^2 y} = \frac{1}{2}$ :

$$\overline{u^2} = \frac{p_1^2}{2v^2 \rho^2} \quad (23)$$

Finally inserting this into (15) und (13) gives:

$$I = \overline{E}v = 2\overline{E_k}v = \frac{p_1^2}{2v\rho} \quad (24)$$

The following comparison shows the remarkable sensitivity of the human ear:

**Atmospheric pressure:**  $10^5$  Pa

**$\Delta p$  squats:** ( $\Delta h = 0.5$  m) 5 Pa

**Conversation:** 0.05 Pa

**Hearing (pressure):**  $20 \cdot 10^{-6}$  Pa - 20 Pa

**Hearing (intensity):**  $10^{-12}$  Wm $^{-2}$  -  $10$  Wm $^{-2}$

If our hearing were even more sensitive one could hear the noise of the air molecules. The hearing range is about 10 octaves from 16 Hz to 16 kHz

## 2.3 Schallpegel

Das Gehör kann, wie die meisten Sinnesorgane, kleine Unterschiede im niedrigen Intensitätsbereich sehr deutlich unterscheiden, welche im höheren Intensitätsbereich nicht mehr wahrnehmbar 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  $I_0$ :

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (25)$$

Mit Gleichung (24) lässt sich der Schallpegel auch durch den Druck beschreiben.

$$L = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (26)$$

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. 3) erstellt.

Beispielsweise gibt die 60-Phon-Kurve an, welcher Schallpegel ein reiner Ton bei zweiöhrigem 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. 4).

## 2.3 Sound Level

Like man of our senses the hearing can discriminate small difference at low intensity well, while same difference becomes indistinguishable at higher intensity. This kind of sensitivity can be approximated by a logarithm. By convention one uses a based 10 logarithm. As a reference one uses the lowest sound intensity  $I_0$  detectable by humans  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  and  $p_0 = 10 \text{ } \mu\text{Pa}$  at 1 kHz:

The sound level  $L$  as a measure of the strength of sound is define as 10 times the base-10 logarithm of the ratio of its intensity  $I$  to the human detection limit  $I_0$ .

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (25)$$

Using (24) this can be converted into a ratio of the pressure maximum:

$$L = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (26)$$

The unit of sound levels is called decibel in honour of the inventor of the telephone, *Graham Bell*. The perception of the loudness level by humans, however, depends strongly on the frequency of the sound. The unit for the measure for the perception of loudness by humans is the *phon*. At 1 kHz the *phon* is set to be equal to 1 dB. The perception of noise of a large number of people of age 18 to 25 with normal hearing was use to determine the of a phon on the frequency (Fig. 3).

As an example the 60 phon line in figure 3 shows which the sound level a tone at a given frequency must reach to be felt as equally loud as a tone of 1 kHz. This properties of the human hearing has be approximated by the **A Filter** of sound meters (Fig. 4).

Humans sense sound level changes as follows:

Der Mensch beurteilt Schallpegel-Änderungen folgendermassen:

0 – 2 dB	nicht wahrnehmbar (meist innerhalb der Messgenauigkeit)	0 – 2 dB	not discernible (usually with measurement errors)
2 – 5 dB	gerade wahrnehmbar, kleine Veränderung	2 – 5 dB	barely discernible, small change
5 – 10 dB	deutlich wahrnehmbare Veränderung	5 – 10 dB	clearly distinguishable change
10 – 20 dB	grosse und überzeugende Veränderungen	10 – 20 dB	large, obvious change

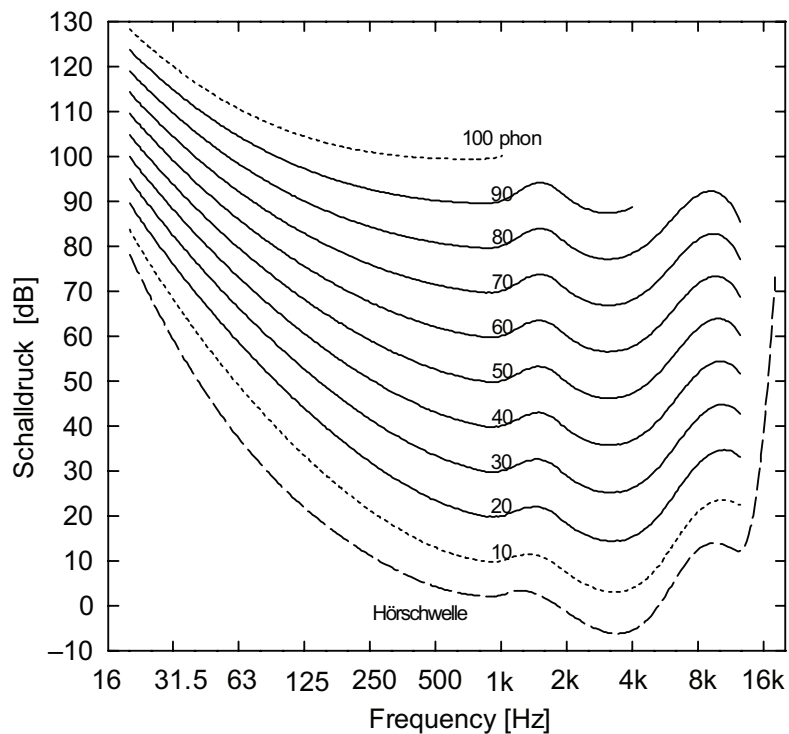


Fig. 3

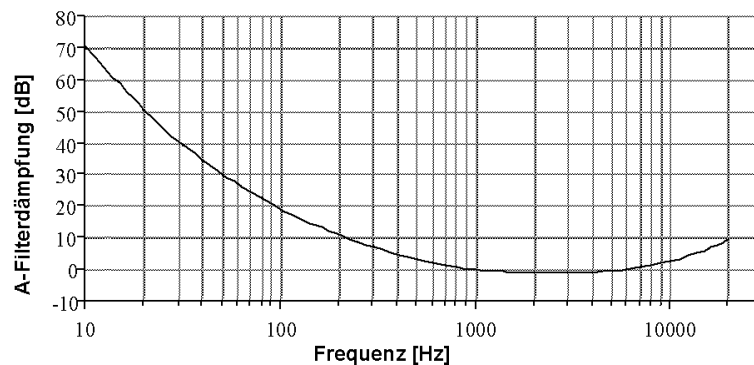


Fig. 4

## 2.4 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:

$$I(r) = I(r_0) \frac{r_0^2}{r^2} \quad (27)$$

Der entsprechende Schallpegel nimmt dann nach Gl. (25) folgendermassen mit dem Abstand  $r$  ab<sup>3</sup>:

$$L(r) = L(r_0) - 20 \log \frac{r}{r_0} \quad (28)$$

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>3</sup>Herleitung von / Derivation of (28):

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

## 2.4 Distance Law

The sound level depends on the distance  $r$  from the source. In the far field the source can be regarded as point source and the sound travelling as pressure spheres around this point source. Neglecting the small energy loss the energy of the sound will be spread over an ever enlarger sphere. Hence the ratio of intensity  $I(r)$  of the sound intensity at distance  $r$  to a reference intensity  $I_0$  at distance  $r_0$  will be

$$I(r) = I(r_0) \frac{r_0^2}{r^2} \quad (27)$$

and the resulting distance law for the sound level (25) is :

$$L(r) = L(r_0) - 20 \log \frac{r}{r_0} \quad (28)$$

Besides the small dissipation of sound energy in air there are also losses by ground absorption which make reproducible measurement outside often difficult. The air dissipation depends strongly on meteorological conditions like the air moisture.

### 3 Aufgaben

1. Berechne für die 4 Lochreihen der Sirene die Grundfrequenzen,
2. 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  $\bar{v}$ .
3. Messe die Raumtemperatur und vergleiche die unter 1 bestimmte Schallgeschwindigkeit mit den theoretischen Formeln (11) und (12). Welche Formel passt besser und weshalb?
4. Machen Sie mindestens eine der folgenden Aufgaben:
  - a) Eiche das Schallpegelmessgerät und vergleiche bei konstanter Lautstärke den Messpegel des A-Filters mit einer Phonlinie.
  - b) Messen Sie Ihre eigene Hörempfindlichkeit und vergleichen Sie diese mit den Phonlinien in Fig. 3.
5. Überprüfe das Abstandsgesetz Gl. (28) bei hohen Frequenzen.
6. Berechne und messe die Summe verschiedener Schallpegel und versuche den Unterschied zwischen Summe und Einzelton zu hören.

### 3 Tasks

1. Calculate for the four rows of holes in the siren its (fundamental) frequencies  $f$ .
2. Use *Kundt's tube* to measure the corresponding wave lengths  $\lambda$  for these frequencies  $f$ .
3. Measure the room temperature and compare the measured sound velocity with the theoretical values according to (11) and (12). Which formula fits better. What are therefore the thermodynamic conditions for sound waves.
4. Do at least one of the following tasks:
  - a) Gauge the sound meter and compare the sound level of the A filter with a phone line in figure 4.
  - b) Measure your own hearing sensitivity and try compare it with phon lines shown in Fig. 3.
5. Verify the distance law (28) at high frequencies.
6. Calculate and measure the sound level of 1, 2, 3 or 4 nozzles blowing at the same time onto the disk of the siren, measure the sound level and compare it to your sense of relative loudness of the siren.

## 4 Durchführung der Versuche

1. **Messen der Schallgeschwindigkeit:** 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. 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!

Die von der Sirene genau 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 Frequenzverdopplung,  $\frac{1}{10}$  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 Kontrol-

## 4 Execution of the Experiments

1. **Measuring the speed of sound:** The siren is a plastic disk with holes at different distances from the center in four concentric rows. An electric motor rotates the disk. There are four nozzle to blow air into one or more rows of holes. The revolution speed  $f_r$  of the disk and the number  $n$  of holes can be used to calculate the frequency of the fundamental frequency  $f$  of the siren:  $f = n f_r$

*Note:* By using a moderate air flow weak you can keep the noise level reasonable. You may like to use the ear muffs when working with the siren.

Test the display on the frequency generator by ear. To this end let the generator produce use a sine wave and tune its frequency to the calculated frequency of the siren. Now listen that to both the generator and the siren and compare the pitch.

Now check your own hearing with the frequency generator. Some humans can hear pitch differences of 0.6. Can you? This corresponds to about 1/10 of a half-tone (An octave are 12 half-tones and corresponds to a doubling of the frequency. Repeat your measurements to determine the error of your measurement. Do these experiments blindly: One student changes the frequency at the generator, the other says when the pitch is different or the same.

After checking the frequency generator the speaker is mounted at one end of *Kundts tube*, where it may excite a standing wave. The plug at the opposite end is moved until the tube reaches resonance in the tube. This is the case if the effective length  $L$  of the resonator tube

le 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 Korkpulver 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>4</sup>. Der Abstand von Knoten zu Knoten bzw. von Bauch zu Bauch entspricht gerade der halben Wellenlänge. Daraus können Wellenlänge und Schallgeschwindigkeit Gl.(17) bestimmt werden. Man überlege sich, wie die Genauigkeit der Messung der Wellenlänge optimiert werden kann.

**Vorsicht** Das Rohr mit Korkpulver lädt

<sup>4</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.

is a multiple of half the wave length  $\lambda$  ( $L = n\lambda/2$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , see experiment 4). The cork dust will start swinging make the standing wave visible. At the locations of maximum velocity the dust is stirred up and settles at the nodes where the air is not moving<sup>2</sup>.

The distance  $d$  between 2 nodes will be half the wave length ( $d = \lambda/2$ ). The students should try find means to measure this distance as precise as possible.

### Remarks

- Avoid touching the tube. The cork in the tube gets easily electrostatically which may hinder your measurements.
  - For the highest four frequencies the cork particles no longer move. Try to find alternate suitable method to determine the wave length and document it in your report. *Hint*: Use the sound level. Ask your TA if cannot figure out an alternate way.
2. **Calculation of the speed of sound** The air temperature is measured with a room thermometer. The molar mass is calculated from the composition of air ( $\approx 80\% \text{ N}_2$ ,  $20\% \text{ O}_2$ ) and the molar masses of N and O ( $M_N = 14 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,  $M_O = 16 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ). The adiabatic exponent of air is  $\gamma_{\text{air}} = 1.4$ .
- Use (11) and (12) to calculate the speed of sound and compare the result with your measurements. Estimate the error for both methods and check one of the

<sup>2</sup>Note that wave length is apparent at the longer scales. The small sharp ripples with are caused by the interaction of the cork dust particles with each other. The width of these ripples is set by the mean size of the cork particles and not by the pitch of of the sound.



sich leicht elektrostatisch auf. Deshalb möglichst wenig berühren!

**Bemerkung** 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.

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

Benütze die Gleichungen (11) und (12) 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?

3. **Messen mit dem Schallpegelmessgerät:**

Für die Messungen der Aufgaben 3 und 4 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

theoretical values agrees with your measurement with your measurement errors. According to your measurements which assumption isothermal or adiabatic appears to be the better one.

3. **Using the sound meter:** For the measurements of tasks 4a, 4b and 5 one removes the sound meter is removed from *Kundt's tube* and mounted on a rack.

The sound level is measure with the integration digital sound meter CEL-269 (Fig. 5). Read its description and calibrate it before the measurements (see below). The calibration is done in mode "SPL", while most measurement are using mode "LEQ". Note that one always has to reset the averaging before each measurement (see reset below).

Select a frequency with the synthesizer and adjust the volume until the sound meter with A-filter displays 80 dB. Now turn of the A-filter (i.e., switch to the C setting) and record the linear sound level in a phon diagram (back of the measurement sheet). Repeat this procedure for all frequencies listed. For each measurement you will have to readjust the sound level with A-filter to 80 dB. The measurements should follow the 80 dB phon line.

Such sound level measurements are delicate, because the room an all items in the room will reflect sound and may resonate. A change of position of the persons taking the measurements may easily change the readings. To keep errors small the sound meter should be mounted close to the speaker.

4. **Verification of the Distance Law** Check (28) using the synthesizer and the sound meter. By mounting the sound meter on

CEL-284. Die Eichung erfolgt im Betriebsmodus “SPL”, die Messungen zu meist im Modus “LEQ”, wobei jeweils vor Messbeginn die Mittelung zurückge setzt werden soll (Reset).

Stelle am Frequenzgenerator die Laut stärke bei einer bestimmten Frequenz so ein, dass der Schallpegelmesser 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). Wieder hole den Vorgang für alle angegebenen Frequenzen<sup>5</sup> Die entstehende Kurve soll te ungefähr der 80-Phonkurve folgen; Abweichungen zeigen den Unterschied zwischen dem A-Filter und der Empfind lichkeit des menschlichen Ohrs.

Die Schallpegelmessung ist sehr heikel, da der Raum und die sich in ihm befind lichen Gegenstände den Pegel beeinflus sen. Wenn die messende Person während der Messung den Standort wechselt, so sind Pegeländerungen feststellbar. Um den Fehler gering zu halten, ist es sinn voll, das Schallpegelmessgerät fest und nahe an den Drucklautsprecher zu mon tieren.

4. **Überprüfung des Abstandsgesetzes:** Über prüfe die Gültigkeit der Gl. (28) mit Hil fe des Tongenerators, des Drucklautspre chers und des Schallpegelmessgerätes. Durch Verschieben des auf der Schiene montierten Messgerätes gegenüber dem Lautsprecher können verschiedene Ab stände eingestellt werden. Um Interfe renzen durch reflektierte Wellen zu ver meiden, sind kurze Wellen (sehr hohe

the rack and moving it towards and away from the speaker one measure the sound level at various distances. To avoid in terference and reflection from the walls it is best to use higher frequencies and short distandes. The distance, however, must not be smaller that the size of the speaker. Why?

5. **Addition of Sound Levels:** The more than one nozzle can be turn on to blow air onto the disk of the siren. With 2 nozzles blowing air with the same pressure onto the siren instead of just one the sound intensity will doubles. With 3 it must triple. Measure the corresponding sound levels with the sound meter and compare the results with (25). Compare these re sults with your subjects sense of sound volume. Make at least three reasonable measurements with different numbers of nozzles blowing.

The sound meter must be kept at the same location for all these measurements.

<sup>5</sup>Für jede neue Frequenz muss die Lautstärke wieder so eingestellt werden, dass das Messgerät mit A-Filter 80 dB anzeigt.

Frequenzen) zu benützen 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?

5. **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. (25)). 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.

## 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)

## 5 Sound meter CEL-26

### Switch

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

OFF	
F	Fast changes of the sound von 125 milli-seconds (ms)
S	Slow, Change of about 1 second
I	Impuls 35 ms rise and 1500 ms fall

**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, 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

A HI	Frequency weighting using the A-filter, high level (65 – 135 dB)
A LO	Frequency weighting using the A-filter, low level (30 – 100 dB)
C HI	Linear (no weighting), high level (65 – 135 dB)
C LO	Linear (no weighting), i low level (30 – 100 dB)

*Remark:* Originally position *C* corresponded to an addition frequency filter, which has been disabled to obtain a linear sound level at this position.

### Operating Mode

The current mode is shown in the upper left of the display, to the right the current the In the upper left. Press the mode button to select the operating mode. Operating modes:

- **SPL** Current sound level, update every 0.5 s (default)
- **MAX** Peak sound level
- **LEQ** Equivalent average sound level
- **BAT** Battery level; should be  $\geq 3.2$  V

### Reset

Reset of the current function.

### General Reset

All function are reset if the position of *range* or the *response* switch are changed.

### Calibration of the sound meter

Put the microphone of the sound meter into the black opening of the acoutical calibrator CEL-284. the sound meter CEL-269 in settings A HI, F, and SPL must display 114 dB. If not place the small screw driver into the opening labeled CAL and turn it until it displays 114 dB.

(F-S-I) oder Frequenzfilter / Messbereich (A HI - A LO - C LO - C HI) geändert wird.

### Eichen des Schallpegelmessgeräts

Mikrophon-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 mit dem beigelegten Schraubenzieher auf 114 dB korrigiert werden.

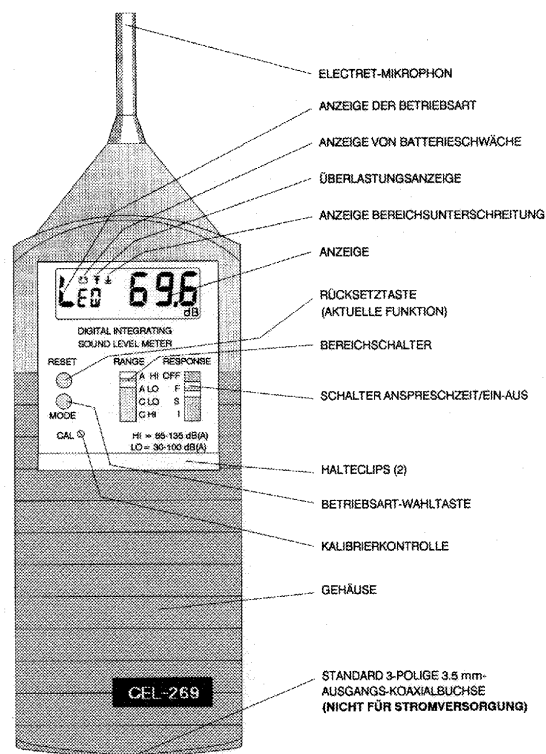


Fig. 5