

Versuch M15 - Stehende Schallwellen		
Name:	Mitarbeiter:	
Gruppennummer:	lfd. Nummer:	Datum:

## 1. Aufgabenstellung

### 1.1. Versuchsziel

- 1.1.1. Messung und Auswertung zeitlich veränderlicher Spannungen mit dem Oszilloskop.
- 1.1.2. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit durch Messung der Resonanzfrequenzen eines akustischen Resonators.

Beschäftigen Sie sich mit folgenden Schwerpunkten des Versuches:

- Aufbau und Funktionsweise eines Oszilloskops
- Schallausbreitung, stehende Wellen, Resonanz

### 1.2. Messungen mit dem Oszilloskops

- 1.2.1. Verwenden Sie folgende Grundeinstellungen für den X- und Y-Kanal (CH1 und CH2):  
Kopplung: DC                      Zeit: XY                      Spannungsmessbereich: 1 Volt/DIV  
Mode: CH2                      Trigger-Mode: AUTO                      Trigger-Source : CH2 .  
Positionieren Sie den Leuchtpunkt in der Mitte des Displays (Drehknöpfe POSITION).
- 1.2.2. Verbinden Sie das Multimeter mit der Gleichspannungsquelle und stellen Sie 3V ein. Schließen Sie parallel den Y-Eingang (CH2) des Oszilloskops an und messen Sie mit diesem ebenfalls die angelegte Spannung. Variieren Sie den Spannungsmessbereich (VOLTS/DIV) und kontrollieren Sie, ob immer derselbe Wert dargestellt wird.
- 1.2.3. Stellen Sie die Zeitablenkung auf 0,5 s/DIV (Sekunden pro Kästchen) und verändern Sie die am Y-Kanal anliegende Gleichspannung manuell schnell und langsam. Wiederholen Sie dies bei anderen Ablenkzeiten (5 ms/DIV, 10 ms/DIV). Welche Ablenkzeit würden Sie wählen, wenn Sie eine Wechselspannung mit einer Frequenz von ca. 1000 Hz darstellen wollen?
- 1.2.4. Schalten Sie den Y-Eingang (CH2) auf AC-Kopplung und verändern Sie wiederum die angelegte Spannung manuell. Gibt es einen Unterschied zur vorherigen DC-Kopplung? Wozu dient die AC/DC-Taste? Welche Kopplung wäre zur Darstellung eines Signals besser geeignet, wenn dieses einen hohen Gleichanteil hat?
- 1.2.5. Stellen Sie den in das Oszilloskop integrierten Funktionsgenerator auf eine Wechselspannung von ungefähr 1 V Amplitude und eine Frequenz von ca. 1000 Hz ein. Verbinden Sie den Ausgang des Funktionsgenerators mit dem Y-Eingang (CH2) und bestimmen Sie Amplitude und Frequenz dieses Signals. Welche Genauigkeit ist dabei erreichbar? Um ein stehendes Bild zu erhalten, werden die Einstellungen Trigger-Source: CH2 und Trigger-Mode: NORM realisiert sowie der Trigger-LEVEL variiert.
- 1.2.6. Trennen Sie den Funktionsgenerator von der Signalleitung. Stellen Sie den Y-Kanal auf den kleinsten (empfindlichsten) Eingangsspannungsbereich und drücken Sie mit Daumen oder Finger auf das offene Ende der Signalleitung. Bestimmen Sie die Grundfrequenz des jetzt sichtbaren Signals. Wodurch wird es verursacht?

### 1.3. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit durch Messung der Eigenfrequenzen eines akustischen Resonators

- 1.3.1 Ziehen Sie das Schallrohr auseinander und schließen Sie den Schallgeber eines der beiden Rohre (Empfänger- und Gebermodule sind identisch) den Funktionsgenerator an. Für die Amplitude des ausgegebenen Signals werden 3V eingestellt. Variieren Sie die Signalfrequenz, bis Sie einen Ton hören. Bestimmen Sie die höchste Frequenz, die Sie mit Ihrem Ohr noch wahrnehmen können.
- 1.3.2. Stellen Sie im Folgenden den Trigger-Mode auf AUTO und nur wenn Sie Messungen durchführen wieder auf NORM.
- 1.3.3. Schließen Sie den Schallempfänger des anderen Rohres an das Oszilloskop an und sprechen Sie in das Rohr. Schauen Sie sich den Spannungsverlauf bei verschiedenen Lauten und Geräuschen an.
- 1.3.4. Schieben Sie beide Rohre bis zum Anschlag zusammen und bestimmen Sie durch Variation der Generatoreinstellung die kleinste (erste) Eigenfrequenz, die sich durch eine maximale Signalamplitude auszeichnet. Messen Sie auch die nächsten Eigenfrequenzen und ermitteln Sie daraus mit Gl. (11) durch Anwendung der linearen Regression die Schallgeschwindigkeit und die zugehörige Messunsicherheit. Hierzu ist die genaue Kenntnis des Abstands zwischen Schallgeber und Schallempfänger erforderlich.

## 2. Grundlagen

### 2.1. Beschreibung von Wellen

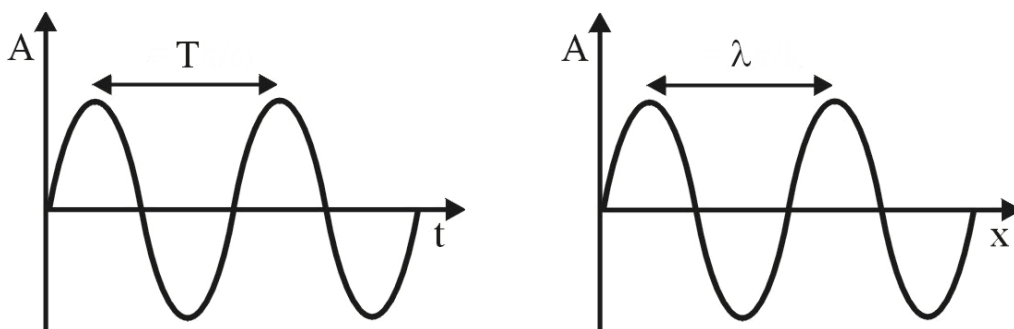
Erzeugt man in einem Medium eine periodische Anregung, so bewirken elastische Kopplungen, dass sich der Schwingungsvorgang in Form einer Welle mit einer charakteristischen Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium fortpflanzt. Im eindimensionalen Fall kann eine in  $x$  – Richtung laufende ebene Welle durch

$$A(x, t) = A_0 \sin\left(2\pi \cdot f \cdot t - 2\pi \cdot \frac{x}{\lambda}\right). \quad (1)$$

beschrieben werden. Hierbei sind  $t$  die Zeit,  $A_0$  die Amplitude,  $f$  die Schwingungsfrequenz und  $\lambda$  die Wellenlänge. Zwischen Frequenz  $f$  und Schwingungsdauer  $T$  gilt die Beziehung

$$f = \frac{1}{T}. \quad (2)$$

In Abb. 1 sind die Zeitabhängigkeit der Amplitude einer Welle an einem festen Ort  $x = \text{const.}$  und ihre Ortsabhängigkeit zu einem festen Zeitpunkt  $t = \text{const.}$  dargestellt. In beiden Fällen erhält man einen sinusförmigen Verlauf.



**Abb. 1** Zeit- (links) und Ortsabhängigkeit (rechts) einer Welle.

Zur Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  der Welle verfolgt man den Ort einer bestimmten Phase in Abhängigkeit von der Zeit, d.h. es gilt

$$A(x,t) = A(x + dx, t + dt)$$

$$\rightarrow 2\pi \cdot f \cdot t - 2\pi \cdot \frac{x}{\lambda} = 2\pi \cdot f \cdot (t + dt) - 2\pi \cdot \frac{(x + dx)}{\lambda} . \quad (3)$$

Auf diese Weise findet man

$$2\pi \cdot f \cdot dt - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot dx = 0 \rightarrow c = \frac{dx}{dt} = f \cdot \lambda . \quad (4)$$

Man unterscheidet generell zwischen zwei Arten von Wellen. Bei *transversalen Wellen* erfolgt die Schwingung senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung (z.B. Wellen an der Wasseroberfläche). Findet der Schwingungsvorgang parallel zur Ausbreitungsrichtung statt, spricht man von *longitudinalen Wellen* (z.B. Schallwellen).

### 2.1.1. Schallwellen

Bei Schallwellen handelt es sich um periodische Druck-, Dichte- bzw. Teilchenschwankungen, die sich in einem kompressiblen Medium ausbreiten. Da in Gasen keine Scherspannungen auftreten, sind Schallwellen dort stets Longitudinalwellen. Die Schallgeschwindigkeit in einem idealen Gas kann wie folgt berechnet werden:

$$c_{Schall} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}} . \quad (5)$$

Hierbei sind  $\gamma$  der Adiabatenexponent des Gases,  $M$  die molare Masse,  $R$  die universelle Gaskonstante und  $T$  die absolute Gastemperatur. Die Schallgeschwindigkeit hängt im Fall eines idealen Gases in erster Näherung nur von der Temperatur ab. Für Luft gilt im Bereich der Zimmertemperatur  $T - T_0 \ll T_0 = 273,15 \text{ K}$  in guter Näherung

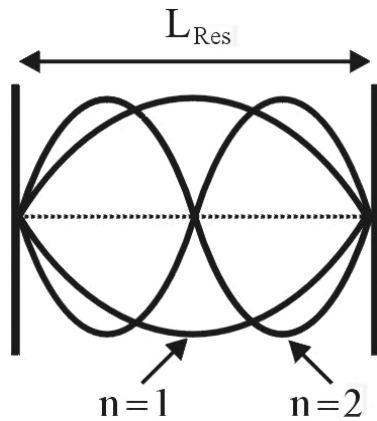
$$c_{Schall} \approx 331,6 \cdot \left( 1 + \frac{T - T_0}{2 \cdot T_0} \right) \text{ ms}^{-1} . \quad (6)$$

Schallwellen können z.B. durch die schwindende Membran eines Lautsprechers erzeugt werden. Andererseits bringen Schallwellen Membrane zum vibrieren. Werden diese Membranschwingungen wie in einem Mikrofon in elektrische Signale umgewandelt, so können sie mit einem Oszilloskop sichtbar gemacht werden.

### 2.1.2. Stehende Wellen

Überlagern sich zwei Wellen gleicher Amplitude und Frequenz, jedoch mit entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung, so bildet sich eine *stehende Welle* aus. Beim Schall kann dies durch Mehrfachreflexion an den Enden eines mit Luft gefüllten Rohres erreicht werden. Dabei stellt sich die Phase der beiden Teilwellen so ein, dass am *losen Ende* (Mikrofonmembran) sog. Wellenbäuche der Gasteilchengeschwindigkeiten entstehen. Für den Druck gilt umgekehrt, dass dort Druckknoten resultieren.

Das Erscheinungsbild einer stehenden Welle ist durch Knoten und Bäuche im Abstand von  $\lambda/2$  charakterisiert. Die Amplitude der stehenden Welle wird maximal, wenn die Länge der Luftsäule im Rohr ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge beträgt. In diesem Fall wird die Luftsäule zu Eigenschwingungen angeregt und es liegt *Resonanz* vor, d.h. das Rohr erweist sich als *Resonator*.



**Abb. 2** Stehende Wellen der Grundschwingung ( $n = 1$ ) und der zweiten Harmonischen ( $n = 2$ ).

Immer dann, wenn die Luftsäule mit einer der Eigenfrequenzen angeregt wird, bildet sich eine stehende Welle maximaler Amplitude aus. Eine stehende Welle der Schwingungsordnung  $n = 1$  hat einen Schwingungsbauch und wird als Grundschwingung, diejenige mit zwei Schwingungsbäuchen, d.h.  $n = 2$ , als erste Oberschwingung oder zweite Harmonische usw. bezeichnet. Für die Resonanzwellenlängen bzw. Resonanzfrequenzen gilt

$$L_{Res} = \frac{\lambda_n}{2} \cdot n \rightarrow \lambda_n = \frac{2 \cdot L_{Res}}{n} \quad \text{bzw.} \quad f_n = \frac{c_{Schall}}{2 \cdot L_{Res}} \cdot n \quad (7)$$

( $L_{Res}$  - Länge des Resonators, Schwingungsordnung  $n = 1, 2, 3, \dots$ ).

## 2.2. Funktionsprinzip eines Oszilloskops

### 2.2.1. Kathodenstrahlröhre

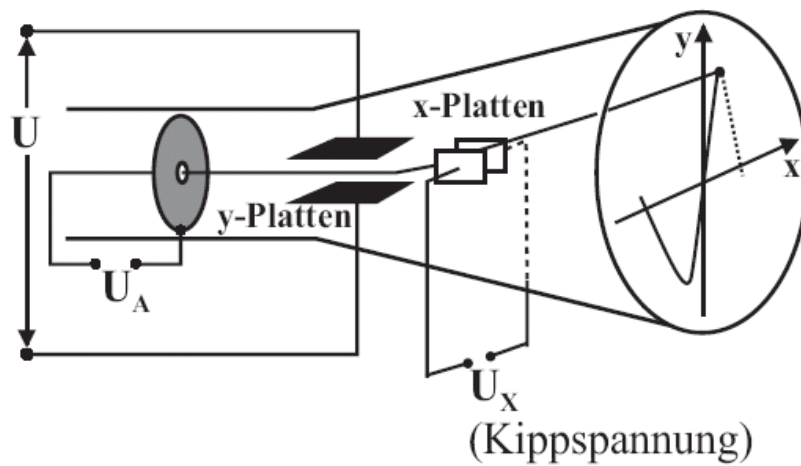
Das Oszilloskop ist ein vielseitiges Instrument zur Darstellung und Messung zeitlich veränderlicher Größen. Dazu muss die Messgröße zunächst in ein Spannungssignal umgewandelt werden. Dies geschieht z.B. für den Schalldruck in einem Mikrofon.

Abb. 3 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Oszilloskops. Es besteht aus einer *Kathodenstrahlröhre*, ein evakuiertes Glasgefäß, in dem ein Elektronenstrahl erzeugt und in Richtung eines Schirmes beschleunigt wird. Der Schirm ist mit einer phosphoreszierenden Schicht bedeckt, die am Auftreffpunkt des Strahls aufleuchtet.

Der Strahl durchläuft zwei in X- und Y-Richtung angeordnete Plattenpaare, durch deren elektrische Felder der Auftreffpunkt des Strahls auf dem Schirm verändert werden kann. Zur Darstellung einer zeitlich veränderlichen Spannung wird das zu untersuchende Signal an die Y-Platten gelegt und eine zeitlich lineare Ablenkung des Elektronenstrahls durch die X-Platten realisiert. Praktisch erfolgt dies vermittels einer internen periodischen, sägezahnförmigen Spannung, einer sog. Kippspannung, durch die der Elektronenstrahl immer wieder in die Ausgangsposition, den linken Schirmrand, geführt wird. Durch die schnelle Bewegung des Elektronenstrahls, seine Dunkelsteuerung bei Strahlrückführung und das Nachleuchten des Schirmes wird ein zusammenhängender Kurvenverlauf wahrgenommen.

Um ein stehendes Bild von periodischen Signalverläufen zu erhalten, kann der Start der X-Ablenkung immer bei gleicher Signalamplitude über den sog. *Trigger* festgelegt werden. Neben dieser Möglichkeit der Darstellung periodischer Signalverläufe kann das Oszilloskop auch im sog. XY-Modus betrieben werden. Hierbei wird eine Spannung als Funktion der anderen dargestellt.

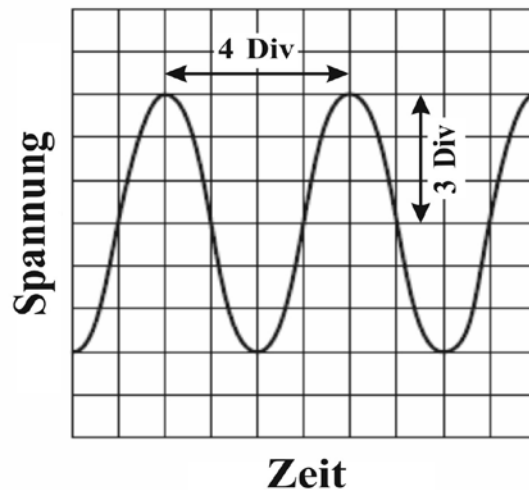
Die Bildschirme der Oszilloskope sind in Skalenteile (SKT, englisch DIV für *divisions*) unterteilt. Man kann über Drehschalter verschiedene Empfindlichkeiten einstellen.



**Abb. 3** Aufbau der Kathodenstrahlröhre eines Oszilloskops.

### 2.2.2. Frequenz- und Amplitudenbestimmung mit dem Oszilloskop

In Abb. 4 ist ein sinusförmiger Wechselspannungsverlauf schematisch dargestellt.



**Abb. 4** Mit dem Oszilloskop aufgezeichneter zeitabhängiger Spannungsverlauf.

Die Zeitablenkung sei im vorliegenden Fall auf  $100 \mu\text{s}/\text{DIV}$  eingestellt und die Y-Ablenkung auf  $2\text{V}/\text{DIV}$ . Die Periodendauer  $T$  kann mit  $4\text{DIV}$  abgelesen werden. Multipliziert man diesen Wert mit der Zeitablenkung, so erhält man eine Periodendauer von

$$T = (4 \text{ DIV}) \cdot (100 \mu\text{s} / \text{DIV}) = 400 \mu\text{s} . \quad (8)$$

Daraus errechnet sich die Frequenz mit

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{400 \mu\text{s}} = 2500 \text{ Hz} = 2,5 \text{ kHz} . \quad (9)$$

Als Amplitude liest man  $3 \text{ DIV}$  ab, so dass sich ein Wert von

$$U_0 = (3 \text{ DIV}) \cdot (2\text{V} / \text{DIV}) = 6\text{V} \quad (10)$$

ergibt.

### 3. Experiment

#### 3.1. Geräte und Materialien

- |                                   |                           |
|-----------------------------------|---------------------------|
| 1 - 2-Kanal Oszilloskop Voltcraft | 5 - Gleichspannungsquelle |
| 2 - Winkelschiene                 | 6 - BNC-Kabel mit T-Stück |
| 3 - Schallrohr                    | 7 - 8 Laborkabel          |
| 4 - Multimeter                    | 8 - Kupplungshülse        |



Abb. 5 Gesamtansicht des Versuchsaufbaus.

#### 3.2. Bedienelemente des Oszilloskops

Abb. 6 und 7 zeigen die Frontplatte des Zweikanal-Oszilloskops mit den wichtigsten Bedienelementen. Dieses Gerät erlaubt die gleichzeitige Darstellung von zwei Signalen (CH1 und H2).

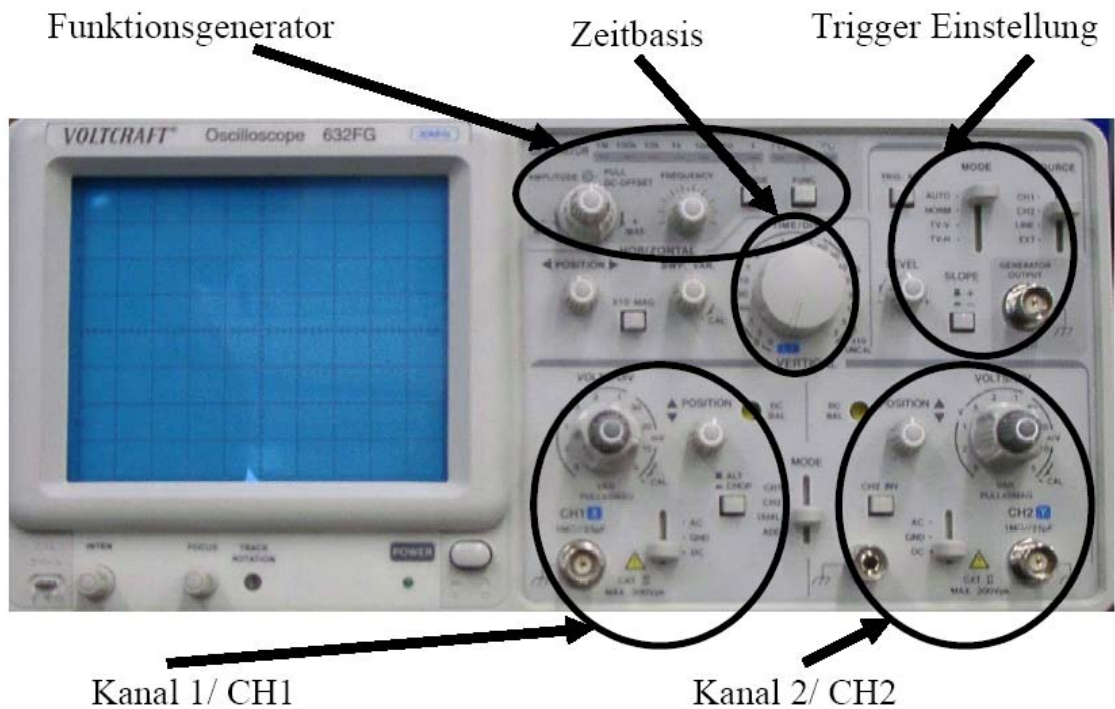


Abb. 6 Überblick über die Bedienelemente des verwendeten Oszilloskop Typ 632FG.



**Abb. 7** Bedienelemente für Netzspannung und Display unterhalb des Displays.

<u>POWER</u>	Netzschalter
<u>INTEN</u>	Intensitätsregelung für den Elektronenstrahl
<u>FOCUS</u>	Bildschärfe
<u>TRACE ROTATION</u>	Kompensation einer Bildverkipfung

### 3.2.1. Interne Zeitablenkung und Funktionsgenerator

Die Bedienelemente der Zeitablenkung sind im unteren Teil von Abb. 8 dargestellt.



**Abb. 8** Bedienelemente für Zeitablenkung und Funktionsgenerator.

<u>TIME/DIV</u>	Ablenkzeit in horizontaler Richtung und Wahl des X-Y-Modus.
<u>SWP. VAR.</u>	Stufenlose Änderung der Ablenkzeit. <b>Diesen Knopf immer in der eingerasteten CAL-Position lassen!</b>
<u>POSITION</u>	Verschiebung des dargestellten Bildes in horizontaler Richtung.

**Das Oszilloskop 632FG verfügt über einen zusätzlichen Funktionsgenerator**, mit dem Sinus-, Dreiecks- und Rechteckfunktionen unterschiedlicher Frequenz ausgegeben werden können (siehe oberer Teil von Abb. 8).

<u>FUNC</u>	Auswahl der Schwingungsform (Rechteck, Sägezahn, Sinus).
<u>RANGE</u>	Grobe Festlegung des verfügbaren Frequenzbereiches.
<u>FREQUENCY</u>	Frequenzeinstellung innerhalb des durch RANGE voreingestellten Bereiches.
<u>AMPLITUDE</u>	Festlegung der Amplitude der ausgegebenen Schwingung.

### 3.2.2. Trigger-Einstellung

Zur Erzielung stehender Oszilloskop-Bilder und der Synchronisation von Signalverläufen dient die in Abb. 9 dargestellte Triggervorrichtung.



**Abb. 9** Bedienelemente für die Trigger-Einstellungen.

SOURCE Wahl der Triggerquelle.

CH1 Kanal 1 wird als Triggersignal verwendet.

CH2 Kanal 2 wird als Triggersignal verwendet.

LINE Triggersignal aus Netzfrequenz abgeleitet.

EXT Ein externes Signal wird zum Triggern verwendet.

MODE Stellt den Triggermodus ein. Sollte während des Versuchs immer auf AUTO stehen.

SLOPE Wahlschalter zwischen positiver und negativer Triggerflanke.

LEVEL Einstellung des Triggerniveaus.

### 3.2.3. Eingangskanäle

Das Oszilloskop verfügt über zwei identische Eingangskanäle (CH1 und CH2), an welche die zu untersuchenden Signale angeschlossen werden können. Die einzelnen Bedienelemente sind für den Kanal CH2 in Abb. 10 dargestellt.



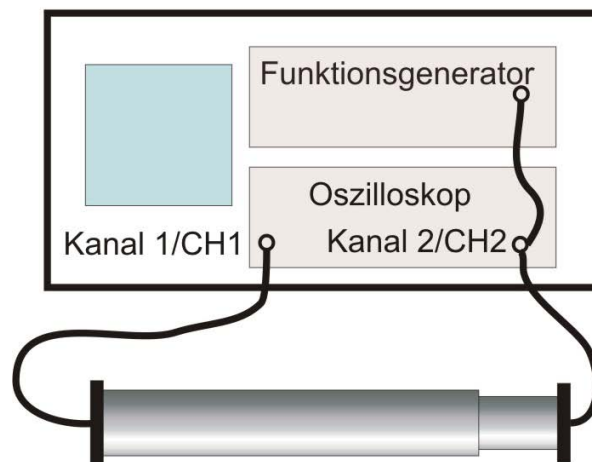
**Abb. 10** Bedienelemente für die Eingangsverstärker der Kanäle CH1 und CH2.



<u>CH1</u>	Nur Kanal 1 wird dargestellt.
<u>CH2</u>	Nur Kanal 2 wird dargestellt.
<u>DUAL</u>	Sowohl Kanal 1 als auch Kanal 2 werden dargestellt.
<u>ADD</u>	Darstellung von Summen und Differenzen.
<u>VOLTS/DIV</u>	Einstellung der vertikalen Verstärkung in Volt pro Skalenteil
<u>VAR.</u>	Variable Einstellung der Vertikalverstärkung. Lassen Sie diesen <b>Diesen Knopf immer in der eingerasteten CAL-Position lassen!</b>
<u>POSITION</u>	Verschiebt das Signal in vertikaler Richtung.
<u>CH2 INV</u>	Invertiert das Signal.
<u>AC</u>	Nur der Wechselspannungsanteil des Signals wird dargestellt.
<u>GND</u>	Verstärkereingang liegt auf Masse. Die Nulllinie kann mit POSITION positioniert werden.
<u>DC</u>	Gleich- und Wechselspannungsanteil des Signals werden dargestellt.

### 3.3. Versuchsanordnung

Zur Erzeugung stehender Schallwellen wird das in Abb. 5 bzw. 11 dargestellte Schallrohr verwendet, das an einem Ende mit einem Schallgeber (Lautsprecher) und am anderen Ende mit einem Schallaufnehmer (Mikrofon) ausgerüstet ist.



**Abb. 11** Versuchsanordnung zur Bestimmung der Eigenfrequenzen des Schallrohres.

An den Schallgeber wird ein vom Funktionsgenerator erzeugtes, konstantes Sinussignal gelegt, das mittels CH2 sichtbar gemacht werden kann. Die Darstellung des vom Schallaufnehmer empfangenen Signals erfolgt über CH1 (MODE auf DUAL).

### 3.4. Hinweise zum Experimentieren und Auswerten

Zur Ermittlung der einzelnen Eigenfrequenzen variiert man die Generatorfrequenz bei konstanter Rohrlänge solange, bis die Signalamplitude des empfangenen Signals jeweils einen maximalen Wert erreicht (Bedienelemente RANGE und FREQUENCY). Die jeweilige Eigenfrequenz wird durch Messung der Schwingungsdauer mittels Gl. (8) und (9) bestimmt (s. Abb. 1 und 4). Zur eindeutigen Identifizierung der einzelnen Schwingungsordnungen  $n$  beginnt man den Durchstimmvorgang bei der tiefstmöglichen Generatorfrequenz. Die erste Resonanzstelle entspricht dann der Ordnung  $n = 1$ , die nächste  $n = 2$  usw. .

Die Bestimmung der effektiven Schallrohrlänge  $L_{Res}$ , d.h. des Abstandes zwischen Schallgeber und Schallaufnehmer, erfordert einen Blick in das Rohrinne und die möglichst genaue Ermittlung der inneren Abmessungen. Dabei sollte auch die Messunsicherheit  $\Delta L_{Res}$  abgeschätzt werden.

Gl.(7) ermöglicht nach entsprechender Umformung die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit  $c_{Schall}$  mit Kenntnis der Eigenfrequenzen  $f_n$ , ihrer Ordnungen  $n$  und des Abstandes zwischen Schallgeber und Schallaufnehmer (Resonatorlänge)  $L_{Res}$ . Sind mehrere Eigenfrequenzen bekannt, empfiehlt es sich,  $f_n$  über  $n$  aufzutragen und  $c_{Schall}$  aus dem Anstieg der Regressionsgeraden zu berechnen:

$$f_n = b \cdot n \quad \text{mit} \quad b = \frac{c_{Schall}}{2 \cdot L_{Res}} \quad \rightarrow \quad c_{Schall} = 2 \cdot L_{Res} \cdot b \quad (11)$$

(PC-Programm LINEARE REGRESSION auf der Website des Praktikums).

Zur Abschätzung der Messunsicherheit wird das Fehlerfortpflanzungsgesetz angewendet:

$$\Delta c_{Schall} = \sqrt{(2 \cdot L_{Res} \cdot \Delta b)^2 + (2 \cdot b \cdot \Delta L_{Res})^2} . \quad (12)$$

Der Wert für die Messunsicherheit  $\Delta b$  wird ebenfalls vom PC-Programm geliefert.

#### 4. Literatur

Ulrich Haas: Physik für Pharmazeuten und Mediziner.

Ilberg: Physikalisches Praktikum für Anfänger.