Technische Universität München
TUM School of Education
gefördert durch die Deutsche Telekom Stiftung
TUM Science Labs

Akustik - Schallausbreitung, stehende Welle

Versuch im Physikalischen Praktikum des Mathematik/Informatik-Gebäudes

Schüler-Skript und Versuchsanleitung

Bearbeitet von Sheila Sabock, Andrea Bugl, Dr. Werner Lorbeer

Stand 29.10.2012

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung ... 3
1.1. Vorbereitung, Vorwissen, Vorüberlegungen ... 3
1.2. Schallausbreitung in Luft und in Festkörpern ... 4
1.2.1 Wellen in elastisch deformierbaren Medien ... 4
1.2.2. Ausprägung einer stehenden Welle im Rohr ... 5
2. Versuche zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit ... 6
2.1. Messung der Schallgeschwindigkeit in Luft durch Laufzeitmessung ... 6
2.1.1 Versuchsaufbau ... 6
2.1.2 Versuchsdurchführung ... 6
2.1.3 Auswertung ... 7
2.2 Messung der Schallgeschwindigkeit in Festkörpern ... 7
2.2.1 Versuchsaufbau ... 7
2.2.2 Versuchsdurchführung ... 8
2.2.3 Auswertung ... 8
2.3 Messung der Schallgeschwindigkeit in Luft durch stehende Wellen im Rohr ... 8
2.3.1 Versuchsaufbau ... 8
2.3.2 Versuchsdurchführung ... 8
2.3.3 Auswertung ... 9

1. Einführung

Vorüberlegungen

1.1. Vorbereitung, Vorwissen, Vorüberlegungen

Um die Versuche zum Schall gut verstehen zu können, sollte man sich als Vorbereitung mit einigen Begriffen und Phänomenen vertraut machen bzw. sich erinnern.

1. Blitz und Donner folgen aufeinander. Wenn man 12 s Abstand zwischen Blitz und Donner zählt, dann schließt man, das Gewitter ist 4 km entfernt. Welche Schallausbreitungsgeschwindigkeit ergibt sich daraus?
2. „Schall breitet sich als lokale Druckschwankung im Trägermedium Luft aus."
   a) Was bedeutet dieser Satz? Der Abbildung 1 kann man die Modellvorstellung dazu entnehmen.
   b) Die Ausbreitung des Schalls geht „rein mechanisch" vor sich. Man kann sie durch den vollelastischen Stoß von Kugeln verstehen. Was ist eine physikalische Beschreibung dazu?
   c) Kann man von der Mechanik der Schallübertragung in Luft ausgehend verstehen, dass die Ausbreitung des Schalls von Druck und Temperatur abhängt?

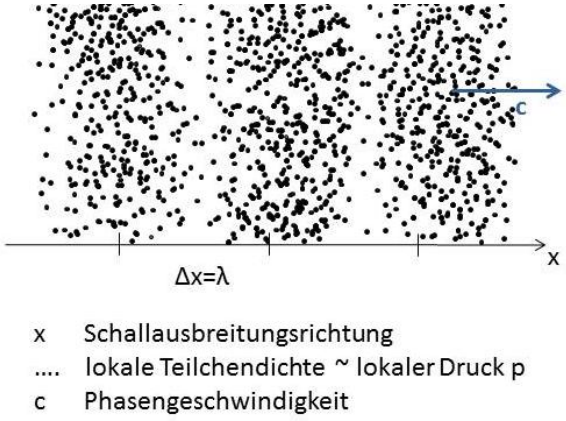

Abbildung 1 Modellvorstellung zur Schallausbreitung in Gasen

3. Eine einfache Rechnung: Welche Wellenlänge λ hat der Kammerton a (880 Hz) in Normalluft $(c = 330\frac{m}{s})$?
4. Man unterscheidet longitudinal und transversal Wellen.
   a) Wieso kann man in Gasen nur Longitudinalwellen beobachten?
   b) In Festkörpern dagegen kann man Schallausbreitung durch longitudinale und transversale Wellen beobachten? Im Skript findet man zur Frage die Antwort!
5. In Abbildung 2 ist der Ausgang eines Versuchs zur Messung von Schallgeschwindigkeit gezeigt. Die blaue Kurve zeigt die Laufzeit des Schalls in einer Wasserkammer. Die grün gekennzeichnete Kurve zeigt die Laufzeit, wenn in die Wasserkammer ein Festkörper (grau) eingebracht wird.

   Es zeigen sich offenkundig Verschiebungen der Signallaufzeiten (L = longitudinal Schwingung beim Transit des

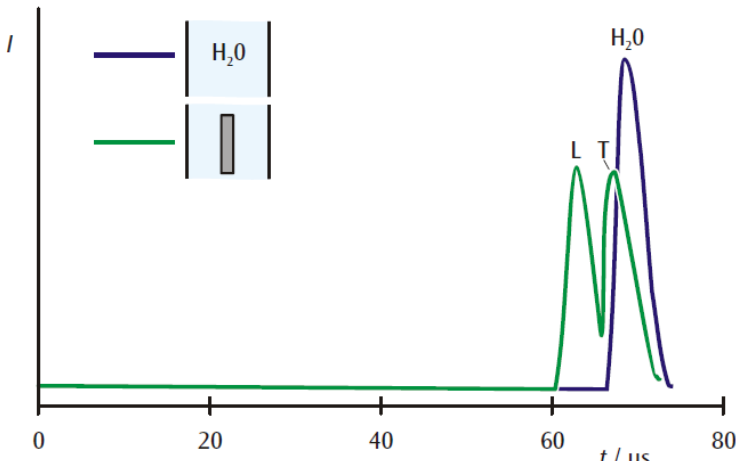

Abbildung 2 Schallausbreitung im gasförmigen Medium

Körpers, T = transversal Signal beim Transit des Körpers).

Welche Schlussfolgerungen können aus dem Diagramm qualitativ gezogen werden?

6. Durch die Überlagerung von einlaufender und reflektierter Schallwelle kann sich eine stehende Welle mit der Ausprägung von Schwingungsbäuchen und Schwingungsknoten ausbilden. Wie lauten die Bedingungen für die Lage von Schwingungsknoten für offene und geschlossene Rohre?

   Tipp: Versuchsanleitung

7. Wir werden am Praktikumstag in dem Versuch „Schallgeschwindigkeit in Festkörpern“ einen piezoelektrischen Körper zur Schallaufnahme verwenden. Was bedeutet dies?

1.2. Schallausbreitung in Luft und in Festkörpern

Theoretisches Konzept

1.2.1 Wellen in elastisch deformierbaren Medien

Betrachtet man ein elastisches Medium, z.B. Metall, bei dem ein Atom aus seiner Gleichgewichtslage verschoben wird, so erfährt dies eine in die Ruhelage zurücktreibende Kraft. Die Ursache dafür sind in Festkörpern die Bindungskräfte zwischen den Atomen. Sie stellen elastische Kräfte zwischen den Nachbaratomen her, die sowohl horizontale wie vertikale Auslenkungen und Rückstellkräfte möglich machen.

In Flüssigkeiten und Gasen ist der Grund eine Druckänderung, die durch die Verschiebung entsteht. Durch diese rücktreibende Kraft kommt es zu einer Schwingung des Atoms um seine Gleichgewichtslage. Allerdings kann man das Atom nicht isoliert betrachteten. Es kommt durch die Kopplung mit den Nachbaratomen zu einer Kraftwirkung auf weitere benachbarte Atome, und die Schwingung breitet sich so als Welle im Medium aus.

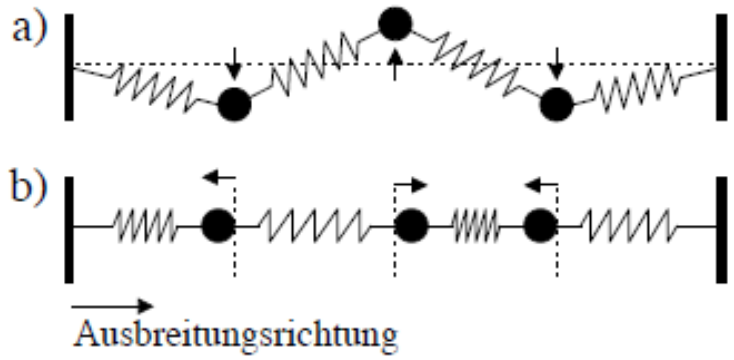

Abbildung 3 Transversale (a) und Longitudinale (b) Schallwellen in Festkörpern

Man unterscheidet also zwei Arten von Wellen wie in Abbildung 3 dargestellt:

Transversalwellen: Die Schwingungsrichtung ist senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

Longitudinalwellen: Die Schwingungsrichtung ist parallel zur Ausbreitungsrichtung.

In Gasen und Flüssigkeiten treten nur longitudinale Schallwellen auf, die sich durch Stöße zwischen Nachbaratomen fortpflanzen.

Weil die Atome In Festkörpern durch elektrische Kräfte elastisch an die Nachbaratome gebunden sind, können sich durch Scherkräfte auch transversale akustische Wellen bilden.

Aus der Verschiebung der Welle um eine Wellenlänge λ pro Schwingungsperiode T lässt sich die Geschwindigkeit v bestimmen, mit der sich der Schwingungszustand (die Phase) der Welle im Medium ausbreitet. Diese Phasengeschwindigkeit v ist gegeben durch $v = c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$ wobei man mit $f = \frac{1}{T}$ die Frequenz der Schwingung bezeichnet.

1.2.2. Ausprägung einer stehenden Welle im Rohr

Eine stehende Welle lässt sich z.B. durch Überlagerung einer einfallenden Welle mit einer reflektierten Welle erzeugen. Sie kommt durch die Überlagerung von räumlich fortschreitenden Wellen zustande. Es entsteht dadurch ein räumlich ortsfestes Phänomen, das den Begriff „stehende Welle“ rechtfertigt.

Bei der Reflexion einer Welle an einer Wand oder an einem geschlossenen Rohrende tritt ein Phasensprung von π $(180°)$ auf. Einlaufende und reflektierte Welle schwingen hier gegenphasig, es liegt also an einer reflektierenden Wand immer ein Schwingungsknoten vor (Abbildung 4a).

Bei der Reflexion an einem offenen Rohrende tritt überraschender Weise Reflexion auf, aber kein Phasensprung. Es bildet sich am offenen Rohrende ein Schwingungsbauch (Abbildung 4b/c).

Von entscheidender Bedeutung ist nun die Ausbildung von *stehenden* Wellen.

Damit wird umschrieben, dass die Lage von Schwingungsknoten und Schwingungsbäuchen im Rohr ortsfest ist. Die Wirkung ist, dass an bestimmten Stellen, den Schwingungsknoten, durch die Überlagerung der hin und rücklaufenden Welle keine Schallamplitude zu beobachten ist. Am Schwingungsbauch dagegen ist eine Schallamplitude zu beobachten.

Unter welcher Bedingung bildet sich nun im Rohr eine *stehende Welle* aus?

Es sind im Prinzip drei Fälle zu unterscheiden, die in Abbildung 4 skizziert sind.

Für ein beidseitig geschlossenes oder beidseitig offenes Rohr führt dies zu einem Zusammenhang zwischen der Länge *L* des Rohrs und möglichen Wellenlängen λ der Schwingungen:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \qquad \textit{(Resonatorbedingung 1, Gleichung 1)}$$

und damit ergibt sich beispielsweise für die Frequenz der anregenden Schallwelle der Zusammenhang $f = n \cdot \frac{v}{2L}$, wobei v die Phasengeschwindigkeit ist.

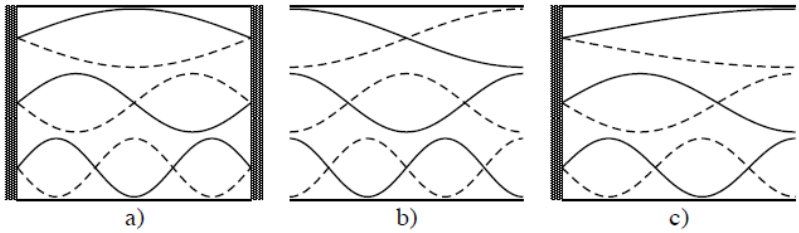

Abbildung 4 Die ersten beiden Oberschwingungen einer Luftsäule in einem Rohr, das a) beidseitig geschlossen, b) beidseitig offen und c) einseitig geschlossen ist.

Für ein einseitig geschlossenes Rohr gilt die Bedingung:

$$L = (2n-1) \cdot \frac{\lambda}{4} \qquad \textit{(Resonatorbedingung 2, Gleichung 2)}$$

und somit für die Frequenz

$$f = \frac{(2n-1) \cdot v}{4L} \qquad \textit{(Gleichung 3)}$$

2. Versuche zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

2.1. Messung der Schallgeschwindigkeit in Luft durch Laufzeitmessung

Versuch Laufzeitmessung

2.1.1 Versuchsaufbau

Schall ist eine Störung des Trägermediums, hier der Luft, durch longitudinal fortgepflanzte Luftdruckschwankungen. Die Ausbreitung der Störung benötigt Zeit, es ist also sinnvoll von Schallgeschwindigkeit c im Medium Luft zu sprechen und wie üblich zu definieren $c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$.

Abbildung 5 Versuchsaufbau Schallgeschwindigkeit in Luft

Die Abbildung zeigt die beiden auf der Dreikantstange hintereinander montierten Mikrophone. Sie sind jeweils an einen Eingang des Oszillographen angeschlossen. Die Mikrophone müssen angeschlossen werden und der Oszillograph benötigt die richtigen Einstellungen. Dazu muss man abschätzen, wie lange der Schall zwischen erstem und zweitem Mikrophon läuft. Das Bild zeigt ein gutes Versuchsergebnis, auf dem der zeitliche Abstand zwischen den Ereignissen dann mit der Cursor-Funktion abgelesen werden kann. Im Vordergrund liegen die beiden Kugeln, mit denen der Schall erzeugt wird.

2.1.2 Versuchsdurchführung

Die Schallgeschwindigkeit der Luft im Praktikumsraum soll durch eine Schalllaufzeitmessung bestimmt werden.

Zuerst sollte man mit der Anordnung spielen! Man muss kurze und definierte Schallimpulse erzeugen! Welchen Effekt kann man beobachten, wenn man den Schall schräg vor oder neben den Mikrofonen erzeugt? Erst wenn sich die Ergebnisse reproduzieren lassen und der experimentelle Ablauf beherrscht wird, sollte mit den Messungen begonnen werden.

Der Aufbau ist in Abbildung 5 gezeigt. Auf der Dreikantschiene werden zwei Reiter mit den Mikrofonen befestigt. Die Position der Reiter lässt sich an der Markierung ablesen.

Die Ausgänge der Mikrofonverstärker werden mit den beiden Kanälen des Oszilloskops verbunden. Bei richtiger Einstellung können, dann auf dem Schirm des Zweikanal-Oszilloskops beide Signale gleichzeitig gesehen werden. Zur Auswertung muss eine sinnvolle Oszilloskop-Einstellung gesucht werden. Mit einer Überschlagsrechnung muss man dazu ermitteln, welche Zeit das Schallsignal von Mikro1 zu Mikro2 benötigen könnte. Bei Fragen kann man sich an die Coachs wenden.

Nun wird das Oszilloskop auf *Single Seq* gestellt. Durch Zusammenschlagen der beiden Metallkugeln (auf der Verbindungsachse der Mikrofone) erzeugt man einen Schallimpuls. Da der Schall am zweiten Mikrofon später eintrifft, ist das Signal dieses Mikrofons verzögert. Die Zeitverzögerung kann mit der *Cursor*-Funktion des Oszilloskops gemessen werden (Abbildung 6). Der Abstand der Schallerzeugung vom ersten Mikrofon muss groß genug sein, damit der Unterschied der Signalstärken beider Mikrofone nicht zu groß wird. Die Messung wird für fünf bis zehn *verschiedene* Abstände der Mikrofone durchgeführt. Dazu sollte die Länge der Dreikantschiene voll ausgenutzt werden.

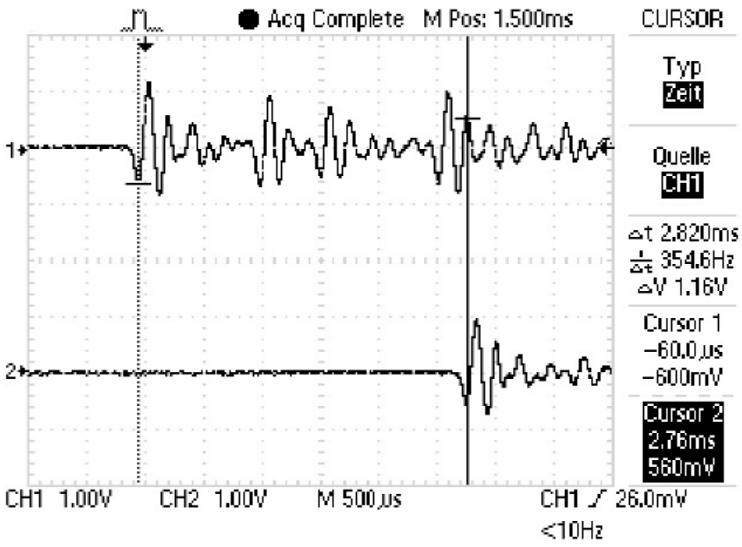

Abbildung 6 Auswertung am Oszilloskop

2.1.3 Auswertung

Für die Auswertung trägt man die Messdaten der Wegdifferenz gegen die Zeit graphisch auf. Durch die Messpunkte wird eine Ausgleichsgerade gelegt. Aus der Steigung der Ausgleichsgeraden kann die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden. Ist die Gerade eine Ursprungsgerade? Welche Gründe hätte ein möglicher Achsenabschnitt?

2.2 Messung der Schallgeschwindigkeit in Festkörpern

Versuch Schall in Festkörpern

2.2.1 Versuchsaufbau

In Festkörpern ist die Bestimmung der Geschwindigkeit der Schallausbreitung nicht so offensichtlich wie in Gasen. Man nimmt einen Stab aus dem Material, dessen Schallgeschwindigkeit bestimmt werden soll, und befestigt einen Schallaufnehmer, einen Piezoelektrischen Körper, am Ende des Stabes. Der Schallaufnehmer setzt die durch den Schall erzeugte Vibration in elektrische Impulse um, die man dann am Oszilloskop sichtbar machen kann.

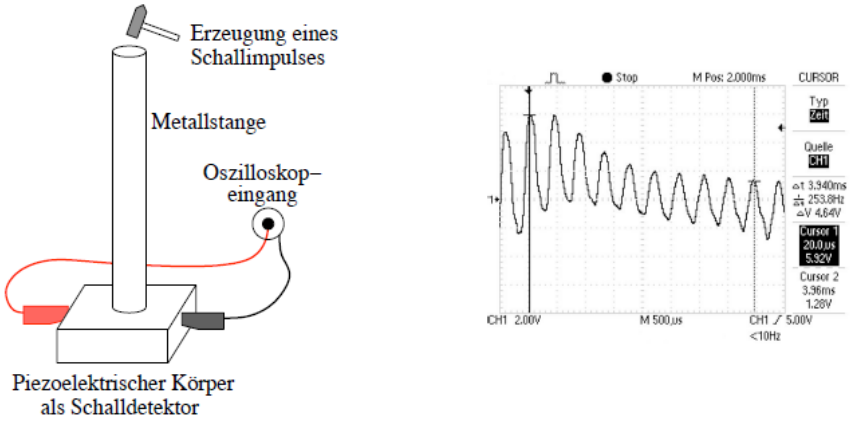

Abbildung 7 Versuchsaufbau zum Schall in Festkörpern und ein typisches Oszilloskopbild

2.2.2 Versuchsdurchführung

Zunächst soll das Material, aus dem die Stäbe bestehen, identifiziert werden. Dann soll die materialspezifische Schallgeschwindigkeit bestimmt werden.

Man startet das Oszilloskop im Aufzeichnungsmodus. Dann erzeugt man am Stabende durch einen Hammerschlag einen Schallimpuls der durch den Stab läuft. Der Schallimpuls erzeugt beim Erreichen des anderen Stabendes einen Signalimpuls der die Aufzeichnung startet. Der Schallimpuls wird im Folgenden jeweils an den Stabenden reflektiert, und erzeugt beim wiederholten Erreichen des Detektors weitere Signale (Abbildung 7) abnehmender Intensität.

Aus der Zeitdifferenz der Signale und der Stablänge lässt sich die spezifische Schallgeschwindigkeit des Materials ermitteln.

2.2.3 Auswertung

Zu beachten wäre, dass in Festkörpern sowohl longitudinale als auch transversale Schallwellen angeregt werden können, die sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausbreiten. (vgl. Vorüberlegungen). Im vorliegenden Versuch werden die unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten von longitudinaler und transversaler Schallwelle jedoch nicht berücksichtigt. Wir messen also die Überlagerung der beiden Schwingungsmoden.

Für die Auswertung benützt man das Oszilloskop (Abbildung 7) als Speicheroszilloskop zur Aufzeichnung der Reflexionen. Die Signallaufzeit im Stab kann dann durch den zeitlichen Abstand zweier Maxima gemessen werden. Man bestimmt mit der Cursorfunktion die Laufzeit von n Reflexionen und erhält so einen Mittelwert für eine Laufzeit. Es ergibt sich für jedes Material eine typische Materialkonstante.

2.3 Messung der Schallgeschwindigkeit in Luft durch stehende Wellen im Rohr

Versuch mit stehender Welle

2.3.1 Versuchsaufbau

Regt man eine Luftsäule in einem Rohr mit einer festen Frequenz an, so lassen sich bei bestimmten Rohrlängen Resonanzen beobachten. Dies ist immer dann der Fall, wenn die Resonatorbedingung (vgl. Seite 4-5) erfüllt ist.

Misst man die Länge des Rohrteils, das in die Schwingungen einbezogen ist und die Anregungsfrequenz, so kann man die Schallgeschwindigkeit errechnen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 8 dargestellt.

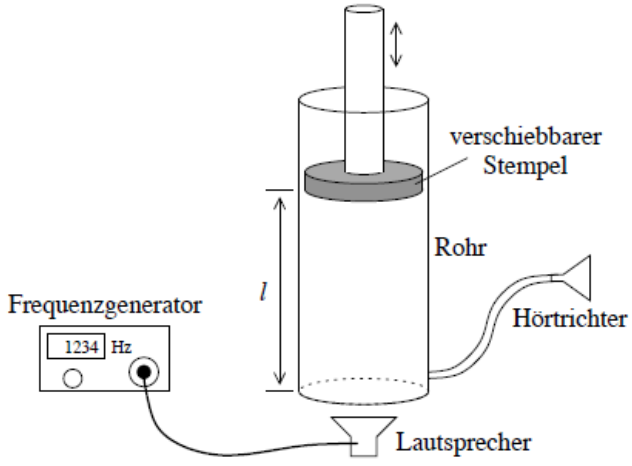

Abbildung 8 Versuchsaufbau Frequenzgenerator mit Rohr

2.3.2 Versuchsdurchführung

Die Schallgeschwindigkeit von Luft soll durch die Methode „stehende Wellen“ in einem einseitig offenen Rohr gemessen werden.

Der Frequenzgenerator wird auf *Sinussignal gestellt* und der Lautsprecher angeschlossen. Zunächst wird eine Frequenz um 1 kHz gewählt.

Dann verschiebt man den Stempel im Rohr und prüft mit dem Hörtrichter, bei welcher Rohrlänge sich ein Resonanzmaximum einstellt. Achtung, ein Sinus-Ton kann als sehr unangenehm empfunden werden, also fährt man den Versuch nur so laut wie nötig. Die Lautstärke muss aber so groß sein, dass im Hörtrichter die Resonanzmaxima deutlich zu erkennen sind.

Über das im Rohr angebrachte Mikrofon kann man die Resonanzstellen auch am Oszilloskop sichtbar machen. Nun werden bei konstanter Frequenz systematisch zu allen Resonanzmaxima die Rohrlängen gesucht, bei der kleinsten Rohrlänge beginnend (Stempel ganz unten). Für jedes Maximum wird die effektive Rohrlänge (von der Öffnung bis zum Stempel) gemessen.

Dann wiederholt man die Messung für zwei weitere Frequenzen, wobei die eine zwischen 500 Hz und 800 Hz, die andere zwischen 1500 Hz und 2000 Hz liegen soll.

2.3.3 Auswertung

Zur Auswertung trägt man die gemessene Länge gegen die Ordnung der Resonanzmaxima für jede Frequenz getrennt auf. Durch die Messdaten sollte sich eine Ausgleichsgerade legen lassen. Aus der Steigung der Geraden und der Frequenz kann mit Hilfe der Gleichung 3 (S. 6) die Schallgeschwindigkeit ermittelt werden. Aus allen drei Messreihen lässt sich ein Mittelwert für die Schallgeschwindigkeit errechnen.

Wie gut ist das Verfahren? Man kann das Ergebnis mit dem Versuch „Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Luft“ und dem Tabellenwert c=343 m/s bei 20°C vergleichen.