

SCHALLWELLEN	GPI
---------------------	------------

Stichworte

Schallwellen; Schallausbreitung in Gasen und Festkörpern, Schallgeschwindigkeit. Stehende Wellen.

Ziele des Versuchs

Untersuchung der Schallausbreitung in Gasen (Luft) und Festkörpern. Zusammenhang zwischen Schallausbreitung und Materialkonstanten.

Messtechnische Erfassung transienter und periodischer Vorgänge und rechnergestütztes Experimentieren.

Literatur

[1]: Kapitel 4.2, 4.4, 4.5

[3]: 23.4, 24.3

Aufgaben

1. Messung der Schallgeschwindigkeit in Luft durch Laufzeitmessung.
2. Beobachtung der Resonanzen einer Luftsäule mit abgeschlossenem bzw. offenem Ende durch Variation der Anregungsfrequenz. Berechnung der Schallgeschwindigkeit und des Verhältnisses der spezifischen Wärmen $c_p/c_v = \kappa$ von Luft (Isentropeindex, Adiabatenkoeffizient).
3. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Metallen aus der Laufzeit bzw. der Grundschwingungsfrequenz für zwei verschiedene Einspannungen des Stabes. Berechnung des Elastizitätsmoduls des Metalls.

Physikalische GrundlagenSchallwellen und Ausbreitungsgeschwindigkeit

In ausgedehnten, elastischen Medien führt eine zunächst lokale Erregung ("Störung", Auslenkung aus der Ruhelage, Druckschwankung) über die elastischen Kräfte zu einer Beeinflussung benachbarter Volumenelemente. So entsteht aus der Anregung eine Welle, die

sich räumlich ausbreitet (*Schallwelle*). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c (Phasengeschwindigkeit, Schallgeschwindigkeit) wird dabei bestimmt durch die Rückstellkräfte (Rückstellkonstante D) und durch die Trägheit der zu beschleunigenden Masse (Dichte ρ).

$$(1) \quad c = \sqrt{\frac{D}{\rho}}$$

In einem Festkörper, wo jedes Volumenelement eine definierte Ruhelage besitzt, können sich longitudinale *Dichtewellen* oder transversale *Scherwellen* ausbilden, wobei die Rückstellkonstanten durch den Elastizitätsmodul E bzw. den Schermodul G gegeben sind.

In Gasen und Flüssigkeiten gibt es nur Dichtewellen (*Druckwellen*), und die Rückstellkonstante ist gleich dem Kompressionsmodul K .

Bei Gasen findet wegen den vergleichsweise kurzen Periodendauern von Schallschwingungen und der schlechten Wärmeleitfähigkeit praktisch kein Energieaustausch zwischen den einzelnen Volumenelementen statt, so dass für die Zustandsänderungen die Adiabatingleichungen (*Poisson-Gleichungen*) gelten. Aus der *Poisson-Gleichung* $p(V; \kappa)$ folgt durch Ableiten für den Kompressionsmodul K :

$$(2) \quad p V^\kappa = \text{const}$$

und

$$(3) \quad K = V \frac{dp}{dV} = -\kappa p$$

wobei κ das Verhältnis der spezifischen Wärmen c_p/c_v ist (*Isentropeindex* oder Adiabatenkoeffizient). Als Schallgeschwindigkeit erhält man damit:

$$(4) \quad c = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} = c(T)$$

Die Schallgeschwindigkeit ist unabhängig vom Druck, da Trägheits- und Rückstellgröße (Dichte und Kompressibilität) in gleicher Weise vom Druck abhängen. Sie ist aber temperaturabhängig wegen der zusätzlichen Temperaturabhängigkeit der Dichte.

Stehende Wellen

In einem begrenzten Volumen tritt durch Reflexion und Interferenz eine Folge (Ordnungszahl n) stationärer Schwingungszustände auf (*stehende Wellen*), wenn die Wellenlänge λ in einem bestimmten Verhältnis zur Resonatorlänge ℓ steht.

Für einen einseitig abgeschlossenen Resonator gilt:

$$(5a) \quad \ell = \left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}$$

Für einen beidseitig abgeschlossenen Resonator:

$$(5b) \quad \ell = n \frac{\lambda}{2}$$

Bei bekannter Wellenlänge und Frequenz kann die Schallgeschwindigkeit dann mit der Fundamentalbeziehung für Wellen berechnet werden:

$$(6) \quad c = \lambda \nu$$

Die Resonanzen stellen die möglichen *Anregungszustände* des Systems dar, in die hinein auch bei einer impulsförmigen Anregung die Anregungsenergie übertragen wird. Eine Stoßanregung wird zunächst als Stoßwelle in dem Resonator hin- und herlaufen. Im Bild der Fourierzerlegung besteht sie jedoch aus einem ganzen Spektrum von Anregungsfrequenzen, wobei die unpassenden Frequenzen und die resonanten Oberschwingungen wegen der höheren Auslenkungsgeschwindigkeiten stärker gedämpft werden, so dass nach genügend langer Zeit allein die sinusförmige Grundschwingung übrig bleibt.

Durch zusätzliche Einspannung des Stabes erzeugt man zusätzliche Dämpfung für alle Eigenschwingungen, die an den Einspannstellen keine Schwingungsknoten haben. So kann man durch Einspannung an den Knoten der ersten Oberwelle erzwingen, dass asymptotisch die erste Oberwelle übrig bleibt.

Zu Aufgabe 2 können durch Wahl des Beobachtungszeitpunktes (Zeitfenster) das unterschiedliche Verhalten untersucht und beide Grenzfälle (Pulsausbreitung, Schwingungszustand) beobachtet werden. Kurz nach der Stoßanregung treten scharfe Impulse auf, deren Laufzeit gemessen werden kann. Einige Zeit nach der Anregung (hier: einige Sekunden) kann dann die sich ausbildende Grundschwingung beobachtet werden.

Darstellung der physikalischen Grundlagen

(zur Vorbereitung als Teil des Berichts): Kurze Darstellung der Schallausbreitung in Gasen. Berechnung der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit. Diskussion stehender Wellen und Resonanzen in begrenzten Medien bei unterschiedlichen Randbedingungen (Luftsäulen, unterschiedlich eingespannte Stäbe).

Apparatur und Geräte

Mikrofon; Schallerzeuger (Patsche). Metallmaßstab.

Resonanzrohr fester Länge mit Lautsprecher und Mikrofon. Funktionsgenerator mit Zähler. Multimeter zur Messung des Mikrofon-Ausgangssignals.

Metallstab mit zwei Einspannvorrichtungen.

Speicheroszilloskop PCS100

Versuchsdurchführung und Auswertung

Zu Aufgabe 1

Eine Klatsche mit eingebautem Kontakt wird über ein Kabel mit einem Mikrofon in einiger Entfernung verbunden und das Mikrofonsignal auf den Eingang des Speicheroszilloskops PCS100 geleitet. Die Klatsche erzeugt gleichzeitig mit dem Knall einen kurzen Triggerimpuls auf dem Mikrofonausgang. Da die elektrische Ausbreitungszeit im Vergleich zur Schallausbreitungszeit vernachlässigbar ist, misst man die Zeit vom Anfang des Trigger (=Anfang der x-Skala) bis zum Anfang des Knallsignals. Die zugehörige Entfernung ist der Abstand der Klatsche zum Mikrofon.

Variieren Sie den Abstand Klatsche-Mikrofon.

Prüfen Sie, ob Sie Schallreflexionen erkennen können (könnte man in einfachen Fällen in die Auswertung einbeziehen).

Charakteristik des Triggersignals: kurze ansteigende Flanke $\ll 1\text{ms}$ und langsam abfallende schwach gekrümmte Flanke ohne Feinstruktur. Daraus folgt als geringster Messabstand Klatsche-Mikrofon $\sim 30\text{cm}$.

Charakteristik des Knallsignals: schnell ansteigende Oszillation ($T \sim 1/4\text{ms}$) größerer Amplitude; Gesamtdauer beträgt wenige ms aber durch Reflexionen an der Wand oder Prellen des Kontakts kann diese evtl. verlängert sein.

Durchführung:

- Verbinden: Klatsche-Mikrofon-PCS100
- Einschalten: Mikrofon, PCS100, PC
- Symbol: OsciPcs100 doppelklicken \Rightarrow Setup-Fenster: Voreinstellungen (Oszilloscope: PCS100, FunctionGenerator: none, LPT Port Adress: 378 LPT1) mit OK bestätigen
- Oszilloskop Fenster: Einstellungen zunächst: [Oscilosc.] \Rightarrow [1ms] \Rightarrow [30mV] \Rightarrow [DC] \Rightarrow [TriggerOFF] \Rightarrow [RUN] Ergebnis: leichtes Rauschsignal
- Pfeifen dicht am Mikrofon \Rightarrow verrauschte Sinuswelle

Für Schallgeschwindigkeitsmessung in der Luft \Rightarrow [TriggerON], \Rightarrow [Single(shot)] Triggerlevel mit Cursor

eine volle vertikale Division nach oben schieben (Triggeraster=1/2 Div) dann immer Statuszeile unter [Single] beobachten Status=| stopped | triggered | Waiting for Trigger |, wenn das Ergebnis nicht gefällt \Rightarrow evtl. andere Einstellungen (Volts, Time, Triggerlevel) \Rightarrow [Single] == nächste Messung

Schallausbreitungszeit: 0 bis Anfang des Knallsignals (ACHTUNG für kurze Entfernungen Klatsche-Mikrofon ist das Knallsignal mit der abfallenden Triggerflanke überlagert, aber erkennbar) Klatsche beim Knallen nicht auf dem Tisch aufsetzen (Körperschall durch Tisch ist schneller als durch Luft).

Ist der Klinkenstecker der Klatsche nicht vollständig in die Mikrofonbuchse eingesteckt oder defekt, triggert nicht der Klatschenkontakt sondern der Knall, als Folge ist dann oft auch der Ruhepegel des Mikrofons nicht auf 0 sondern um mehrere „cm“ erhöht \Rightarrow neue Verbindung bzw. Klatsche oder Mikrofon tauschen. Zur Not kann auch ohne elektrische Verbindung Klatsche-Mikrofon gemessen werden, indem zwei Mikrofone an den Oszilloskop-Eingang geschaltet werden, der Triggerlevel so niedrig wie möglich eingestellt wird, und ein Mikrofon sehr dicht und eins weit entfernt von der Klatsche aufgestellt wird. Dabei sollte ein möglichst großer Abstand zu allen Schallreflektoren gewählt werden - die Signale erscheinen dann zwar auf demselben Kanal (vorn und hinten), können aber mit etwas Glück zugeordnet werden.

Zu Aufgabe 2

Mit einem Funktionsgenerator und einem Lautsprecher werden in dem Resonanzrohr (mit und ohne Abschlussdeckel) stehende Schallwellen angeregt und mit einem Mikrofon nachgewiesen. Die Mikrofon-Ausgangsspannung kann mit einem Multimeter gemessen werden.

Für Messungen am Resonanzrohr Klatschenstecker abziehen, Mikrofon dicht an die seitliche Öffnung am Rohr bringen und Mikrofonspannung mit Multimeter messen – parallel Messung mit Oszilloskop (Run-Modus) schadet aber nicht.

Der Funktionsgenerator muss auf Sinuswellenmodus und Symmetrieknopf auf aus stehen (ganz nach links), sonst werden Oberwellen erzeugt, die zu einer falschen Zuordnung der Resonanzen führen können.

Gemessen werden die Resonanzfrequenzen in Abhängigkeit von der Ordnungszahl. Zur Auswertung gemäß (5a,b) soll ein numerisches Auswerteverfahren entwickelt werden, um der hohen Genauigkeit der Messungen zu entsprechen.

Bei der Diskussion der Ergebnisse ist zu entscheiden, ob das durch den Lautsprecher begrenzte Ende des Rohres als offenes oder als geschlossenes Ende zu betrachten ist.

Zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit nach (3) muss die Temperaturabhängigkeit berücksichtigt werden, wobei Luft in guter Näherung als *ideales Gas* betrachtet werden kann. Die Temperatur kann im Versuchsraum gemessen werden.

Zu Aufgabe 3

Die Experimente und Messungen werden zunächst an dem mittig eingespannten Stab durchgeführt. Mit einem sehr dicht vor die Stirnseite des Stabes gestellten Mikrophon kann die Auslenkung des Stabendes nach Anregung durch Anschlagen mit einem kleinen Hammer registriert werden. Beobachten Sie die zeitlichen Veränderungen der Schwingungsformen. Die Anfangsverteilung (Hin- und Herb-Oszillieren der Stoßwelle) erhält man durch die PCS100 – Einstellungen [Trigger ON], [Single]-shot, [1ms], [30ms], oder [10mV] und Triggerlevel etwa 1 div über 0V.

Spätere Verteilungen erhält man im [RUN]-Modus durch geeignete Wahl des Triggerlevels: je niedriger der Triggerlevel, desto später die letzte Triggerung.

Die asymptotische Sinusverteilung erhält man im [RUN]-Modus mit [Trigger OFF] und [10mV] durch Beobachten des abklingenden Signals und Einfrieren des sinusförmigen Signals durch Anklicken von [RUN] (toggelt zwischen run und stop)

Die asymptotische Schwingung mit geringster Dämpfung ist die Grundschiwingung für Mitteneinspannung bzw. erste angeregte Welle bei $1/4+3/4$ Einspannung.

Störungen:

Wenn das Oszilloskop gar nicht mehr reagiert auch bei Triggerlevel 0 oder [Trigger OFF] und \Rightarrow [Run]: Reset:

einmal das PCS100 Programm schließen und wieder starten.

Sondereffekte: Hervorheben von reflektierten Schallwellen: Ausrichten des Mikrofons nicht auf die Klatsche sondern auf die Wand und Wahl einer günstigen=großflächigen Wand ohne zwischenliegenden Hindernisse.

Wie verändern sich die Schwingungsformen nach dem Anschlagen?

Wann tritt die Grundschiwingung deutlich hervor?

Drucken Sie charakteristische Diagramme für die Grenzfälle aus. Zum Ausdrucken der Signale des PCS100 wird ein zusätzlicher Rechner mit Drucker verwendet. Diese beiden Geräte befinden sich links vom Raumausgang (R. 2.08) und müssen eingeschaltet sein.

Das Drucken erfolgt durch Anklicken des File-Menüs im PCS100 Fenster und dann Print anklicken.

Beobachten und diskutieren Sie die Schwingungsbilder auch für eine (sinnvolle) zweifache Einspannung des Stabes.

Die Dichte des Stabes muss gemessen werden (Waage und Schiebelehre in Raum 2.05).

Ergänzende Fragen

Warum werden höhere Frequenzen stärker gedämpft als niedrigere?