

Eksperiment nummer	132810	Emne	Bølger, lyd		
Version	2017-08-11 / HS	Type	Elevøvelse	Foreslås til	gymABC p. 1/4



## Formål

En undersøgelse af stående bølger i luftsøjlen i et halvåbent rør.

Bestemmelse af lydens hastighed i luft.

## Princip

Resonanser i det halvåbne rør sker ved bestemte kombinationer af lydens frekvens og luftsøjlelængde. I denne øvelse varieres én af disse størrelser ad gangen.

Måleresultaterne er sammenhørende frekvenser og bølgelængder – ud fra disse kan lydens hastighed bestemmes.

## Apparatur

(Komplet apparaturliste på side 4.)

Kundts rør (halvåbent resonansrør)

Funktionsgenerator

Højtaler

Mikrofon og batteriboks

Multimeter

Ledninger og stativmateriel

## Multimetre. Måling af vekselspænding

Det anbefalede multimeter (varenummer 386231) gør det muligt at måle ved nogenlunde afdæmpede lydtryk. Indstil instrumentet således:

- Drej omskifteren op på *mV*
- Tryk på den blå knap for at skifte til AC
- Tryk to gange på *Range* for at fastlåse en visning af *mV* med én decimal.

Ved benyttelse af andre typer af multimeter, skal man sikre sig, at frekvensområdet i hvert fald rækker op over 1500 Hz.

Der skal måles ret små AC spændinger (*mV*). Jo dårligere følsomhed, multimeteret har, jo højere må man skrue op for lyden for at kunne måle.

## Teori

### Resonans i en halvåben luftsøjle

Med et "halvåbent" rør menes, at der er en fast barriere i den ene ende af røret, mens luften frit kan passere ud og ind ad den anden ende.

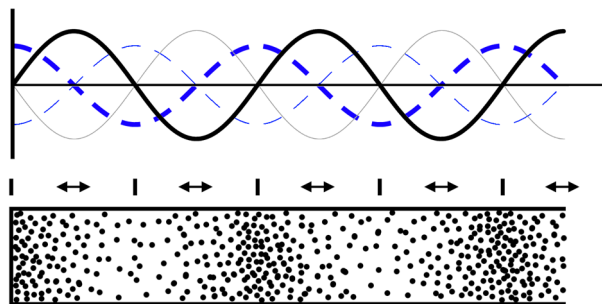
Når lyden rammer den faste barriere, reflekteres den. Den reflekterede og den oprindelige bølge danner en såkaldt stående bølge. En stående bølge er kendetegnet ved, at der i bestemte punkter (*knuder*) er minimal variation af lydtrykket, mens der i andre punkter (*buge*) er maksimal variation.

Lidt overraskende reflekteres en del af lyden også ved den åbne ende, så lyden reflekteres frem og tilbage flere gange. Hvis den to (og fire, seks, osv.) gange reflekterede lydbølge svinger i takt (*i fase*) med den oprindelige, forstærkes de stående bølger – dette fænomen kaldes *resonans*.

Resonans kan kun forekomme, når bølgelængden og rørets længde "passer sammen" – vi vil nedenfor opstille den præcise betingelse.

Figuren skal forestille et øjebliksbillede af luftmolekylerne i røret (de sorte prikker) ved resonans. Vi ser bort fra molekyllernes varmesvingninger.

Luften kan ikke passere rørets lukkede ende til venstre, så her har vi maksimal trykvariation, mens hastigheden er nul. I den modsatte ende af røret er der ikke noget, der holder på luftmolekylerne, så her er trykvariationen nul, mens hastighedsvariationen er maksimal.



Den tykke stiplede blå kurve viser trykfordelingen i røret i dette øjeblik, mens den tykke sorte kurve viser hastighedsfordelingen.

En halv svingningstid senere er det de tynde kurver, der gælder – tilsvarende må man forestille sig, at molekylerne nu ligger tæt dér, hvor der før var langt imellem dem (og omvendt).

Bemærk, hvordan graferne for tryk og hastighed er forskudt en kvart bølgelængde for hinanden.

Nedenunder graferne markerer små lodrette streger *bugene* (maksimal trykvariation / minimal hastighedsvariation), mens dobbeltpilene markerer *knuderne* (minimal trykvariation / maksimal hastighedsvariation).

Det ses, at afstanden mellem knuderne er en halv bølgelængde.

Tænker man sig nu barrieren i venstre ende flyttet en halv bølgelængde til højre, vil den igen udgøre et knudepunkt. Det vil ikke ændre noget på resonansen i den resterende del af røret.

Barrieren kan faktisk flyttes helt hen til det sidste knudepunkt, hvor der kun er en kvart bølgelængde tilbage af røret – og der vil stadigvæk være resonans.

### Betegnelserne "bug" og "knode"

I denne vejledning anvendes "buge" og "knude" med fokus på trykvariationer. Vil man præcisere dette, bruges betegnelserne *trykbuge* og *trykknude*.

Det gælder, at *trykbug* = *hastighedsknode* og *trykknude* = *hastighedsbug*.

### Resonansbetingelsen

Vi kan nu opstille en formel for, hvornår der vil være resonans i en halvåben luftsøjle:

Som vi så i foregående afsnit, skal rørets længde være et helt antal halve bølgelængder plus en kvart bølgelængde.

Kald længden af røret for  $L$  og bølgelængden for  $\lambda$ , og lad  $N$  være et helt, ikke-negativt, tal. Så er betingelsen:

$$L = N \cdot \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4} \quad N = 0, 1, 2 \dots$$

### Generelt om bølger

Det gælder for alle bølger, at bølgelængden  $\lambda$ , frekvensen  $f$  og udbredelsehastigheden  $v$  opfylder

$$v = f \cdot \lambda$$

Kender man således lydets frekvens og bølgelængde, kan lydhastigheden beregnes.

## Udførelse

Opstillingen ses på side 1.

Bemærk, hvordan mikrofonen er placeret umiddelbart udenfor rørets munding. Mikrofonen er følsom overfor lydtrykket – ikke overfor lufthastigheden. Placeret hér vil mikrofonen derfor give et minimalt signal fra sig ved resonans.

Mikrofonen spændingsforsynes fra batteriboksen. Tilslut multimeteret og indstil det til at måle små AC-spændinger.

Højtaleren skal stå 2-3 cm fra rørets munding. Den tilsluttes til funktionsgeneratorens effektudgang. Vælg sinus-formet signal.

Undervejs i øvelsen kan lydstyrken justeres til et passende kompromis mellem målbar signalstyrke og ubehagelig lyd.

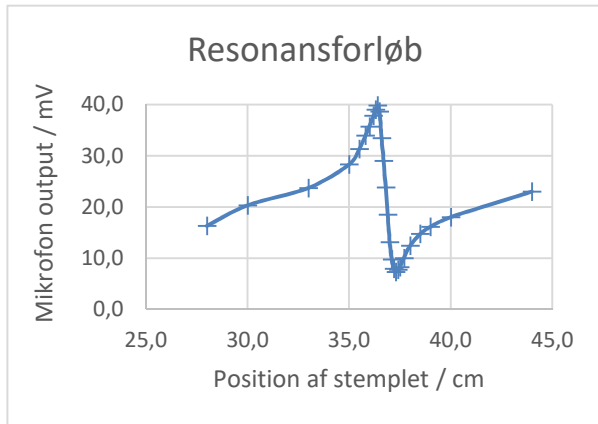
NB: Mikrofonsignalet må ikke være større end 1,5 V, målt på voltmeteret. Ellers bliver signalet forvrænget og den aflæste spænding ugyldig

### 1 – Fast frekvens, varierende længde

Indstil tonegeneratorens frekvens til 500 Hz.

Rørets effektive længde varierer ved at forskyde stemplet. Vi ønsker at finde de rørlængder, hvor der er knudepunkter, dvs. *minimalt lydtryk*.

Man opdager hurtigt, at der tæt på de ønskede knudepunkter findes rørlængder, hvor der måles *maksimalt lydtryk*. (Se figur)



Den pludselige ændring i lydtryk kan både måles og høres, og kan bruges til hurtigt at finde hen i nærheden af knudepunkterne. Ved den sidste finjustering af stemplet bruges dog kun mikrofonspændingen – ikke øret.

Alle positioner, hvor der er resonans, skal findes. (Ved denne frekvens er der 2.)

Rørets længde (fra munden til stemplet) aflæses hver gang med en nøjagtighed på 1 mm.

### 2 – Fast længde, varierende frekvens

Træk stemplet ud til maksimal længde og aflæs rørlængden nøjagtigt.

Start ved frekvensen 1350 Hz og gå langsomt nedad på jagt efter de frekvenser, hvor der er resonans og dermed et knudepunkt i rørmundingen.

Ligesom før ligger der et maksimum i lydtryk tæt på det søgte minimum.

Pas på, at I får alle knudepunkterne med! For at sikre det, kan I tegne en x-akse fra 0 til 1350 Hz og markere de fundne frekvenser med krydser. Krydserne skal ligge med lige stor afstand – det er nemt at se, om der mangler ét.

Ved lave frekvenser (under nogle hundrede Hz) er højttaleren ikke så effektiv. Skru om nødvendigt *lidt* op for lyden og hold godt øje med voltmeteret.

### 3 – Fast frekvens, varierende længde (igen)

Gentag målingerne i punkt 1, dog ved en anden frekvens: Anvend denne gang 1350 Hz.

Der er flere knudepunkter end i punkt 1 – pas på at finde dem alle. Positionerne bestemmes som før med en nøjagtighed på 1 mm.

## Forventet lydhastighed

Som "tabelværdi" for lydhastigheden benyttes en tilnærmet formel. Ved temperaturen  $t$  (celsiusgrader) er lydhastigheden:

$$v_t = \left( 331,3 + 0,606 \cdot \left( \frac{t}{^\circ\text{C}} \right) \right) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dette gælder for tør luft nær stuetemperatur.

Læg 0,0126 m/s til for hver % relativ luftfugtighed.

## Beregninger

Som sammenligningsgrundlag beregnes den forventede lydhastighed  $v_t$  ud fra temperatur og luftfugtighed. Helst målte værdier, ellers kan I gætte på f.eks. 22 °C og 60 %.

I kan med fordel anvende et regneark i det følgende.

### 1 – Varierende længde

Afstanden mellem knudepunkterne er  $\lambda/2$ . Brug dette til at beregne en eksperimentel værdi for lydhastigheden. Sammenlign med tabelværdien.

### 2 – Varierende frekvens

Hvis I fandt *alle* resonansfrekvenserne, må den laveste af disse svare til  $N = 0$  i resonansbetingelsen, den næste til  $N = 1$  osv. Brug disse resultater til at bestemme en værdi for lydhastigheden for hver frekvens – de skulle gerne være nogenlunde ens. Til sidst tages gennemsnit.

Hvis de fundne værdier for hastigheden varierer kraftigt, kunne det være, at I har overset en resonans. Prøv da, om et andet sæt  $N$ -værdier passer bedre.

### 3 – Varierende længde igen

Gå ud fra, at den korteste længde svarer til  $N = 0$ , den næste til  $N = 1$  osv.

Afbild de målte rør-længder  $L$  som funktion af antallet af knudepunkter  $N$ .

Gør rede for, at der forventes en ret linje med hældningskoefficient  $\lambda/2$ .

(Ligner grafen overhovedet ikke en ret linje, så prøv som nævnt ovenfor at omnummerere knudepunkterne, så der droppes en  $N$ -værdi et sted i rækken.)

Bestem hældningskoefficienten og beregn lydhastigheden. Sammenlign med tabelværdien.

## Diskussion og evaluering

Hvor godt passer de målte værdier for lydhastigheden med den forventede?

Stemmer jeres målinger generelt med den teoretiske beskrivelse (på side 2)?

*Ekstraopgave* (for de dygtige): Bevis ud fra formlen for resonansbetingelsen påstanden om, at resonansfrekvenserne skal ligge med samme afstand, når der måles med en fast rørlængde.

## Noter til læreren

### Benyttede begreber

Lydtryk  
Stående bølger  
Resonans  
Knuder  
Buge

### Matematiske forudsætninger

Indsættelse i udtryk  
Grafer  
Brug af regneark er en fordel

### Om apparaturet

Der anvendes en mikrofon for at bestemme resonanspunkterne præcist.

Har man en anden type multimeter i samlingen end de nævnte, kan man selv kontrollere frekvensområdet ved at tilslutte voltmeteret direkte til funktionsgeneratoren. Amplituden fra generatoren er fuldstændig konstant ved frekvenser i det relevante område. Et blødt fald i voltmeterets følsomhed ved høje frekvenser kan godt accepteres.

I stedet for et multimeter kan man vælge at vise signalet på et oscilloskop.

## Detaljeret apparaturliste

### Specifikt for eksperimentet

247500 Kundts rør (Plexiglas)  
250310 Funktionsgenerator, elev  
– eller tilsvarende, f.eks. 250350  
250500 Lydhoved på stang  
248600 Mikrofon  
248601 Kabel, modularstik til 6-polet DIN  
251560 Batteriboks

### Standard laboratorieudstyr

000600 Stativfod (2 stk.)  
000850 Stativstang, 25 cm (2 stk.)  
002310 Stativmuffe, firkantet (2 stk.)  
001800 Stativklemme, gaffelgreb (2 stk.)  
000410 Stubformet fod, firkantet (2 stk.)  
105720 Sikkerhedskabel 50 cm, sort  
105721 Sikkerhedskabel 50 cm, rød  
105740 Sikkerhedskabel 100 cm, sort  
105741 Sikkerhedskabel 100 cm, rød

### Anbefalede multimeter

386231 Multimeter DMM-8062  
Har opløsning på 0,01 mV AC op til 60,00 mV og 0,1 mV opløsning op til 600,0 mV. Kan fastlåse måleområdet. Forsynet med "analog bar-graf".

Ovenstående instrument er det foretrukne, men nedenstående (billigere) alternativer kan evt. anvendes. Da de ikke er så følsomme, skal der skrues højere op for lyden, hvilket kan være anstrengende at høre på.

386135 Multimeter DMM-135A  
Opløsning 0,001 V AC op til 3,999 V. (Derover 0,01 V opløsning.)

386215 Multimeter DMM-125  
Opløsning 0,001 V AC op til 3,200 V. (Derover 0,01 V opløsning.) Forsynet med "analog bar-graf", som dog ikke er særligt anvendelig ved de spændinger, der benyttes her.

## Reklamationsret

*Der er to års reklamationsret, regnet fra fakturadato. Reklamationsretten dækker materiale- og produktionsfejl.*

*Reklamationsretten dækker ikke udstyr, der er blevet mishandlet, dårligt vedligeholdt eller fejlmonteret, ligesom udstyr, der ikke er repareret på vort værksted, ikke dækkes af garantien.*

*Returnering af defekt udstyr som garantireparation sker for kundens regning og risiko og kan kun foretages efter aftale med Frederiksen. Med mindre andet er aftalt med Frederiksen, skal fragtbetøbet forudbetales. Udstyret skal emballeres forsvarligt. Enhver skade på udstyret, der skyldes forsendelsen, dækkes ikke af garantien. Frederiksen betaler for returnering af udstyret efter garantireparationer.*

© Frederiksen Scientific A/S

*Denne brugsvejledning må kopieres til intern brug på den adresse hvortil det tilhørende apparat er købt. Vejledningen kan også hentes på vores hjemmeside.*