

Module 3 – Experimenten

In module 1 en 2 van Fysica Musica is allerlei theorie aan bod gekomen over akoestiek. In deze module kan deze theorie toegepast worden in experimenten. Van ieder experiment is een redelijk beknopte omschrijving gegeven. Deze omschrijving bestaat steeds uit een voorbereiding, een inleiding, een proefomschrijving en een verwerking. De proefomschrijvingen zijn kort opgezet. Je zult daarom op een onderzoekende manier aan de slag moeten. De volgende experimenten komen aan de orde:

- 3.1. Kwadratenwet
- 3.2. Uitdemptijd van de akoestische gitaar
- 3.3. Uitdemptijd van de elektrische gitaar
- 3.4. Nagalmtijd
- 3.5. Bepaling van de geluidssnelheid
- 3.6. Gehoorbescherming
- 3.7. Experiment van Melde
- 3.8. Frequentie-analyse van muziekinstrumenten
- 3.9. De menselijke stem: oooh – aaah – iiih
- 3.10. Frequentie-analyse van effectapparatuur
- 3.11. Frequentie-analyse: akoestisch versus gesampled
- 3.12. Frequentie-analyse van vergelijkbare instrumenten
- 3.13. Frequentie-analyse van de blokfluit
- 3.14. Duimpiano
- 3.15. Golfsnelheid in een gitaarsnaar
- 3.16. Frequentie-analyse van de didgeridoo
- 3.17. Toonladder
- 3.18. Stemming
- 3.19. Gitaar: fretboard
- 3.20. Gitaar: stringbend
- 3.21. Interferentie (1)
- 3.22. Interferentie (2)
- 3.23. Interferentie (3)
- 3.24. Muziekslang
- 3.25. Dopplereffect

3.1. Kwadratenwet

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 1.4. Geluidstrillingen en -golven
- 2.1. Geluidsintensiteit en geluidsniveau

2. Inleiding

Om het volume van geluid vast te leggen, zijn twee grootheden ingevoerd: de *geluidsintensiteit* en het *geluidsniveau*. Naarmate een waarnemer verder van een geluidsbron verwijderd is, zullen beide grootheden in waarde afnemen. Gaan we ervan uit dat een geluidsbron puntvormig is en in alle richtingen een gelijke hoeveelheid energie (geluid) uitstraalt, dan zal de hoeveelheid ontvangen energie afnemen met de afstand tot de geluidsbron. Hierbij geldt de zogenaamde *kwadratenwet*: als de afstand tot de bron n -maal zo groot wordt, dan wordt de geluidsintensiteit n^2 -maal zo klein. Met een nieuwe geluidsintensiteit kan ook een nieuw geluidsniveau berekend worden. De kwadratenwet gaat ook op bij andere verschijnselen in de natuur, zoals de lichtsterkte en de intensiteit van ioniserende straling.

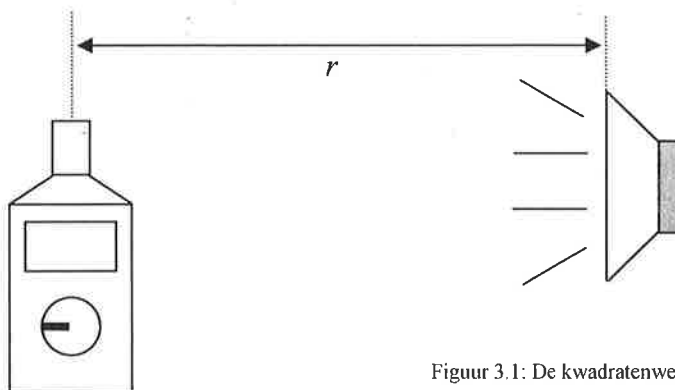
In dit experiment wordt de kwadratenwet voor geluid verder onderzocht.

3. Benodigheden

- toongenerator (of een andere geluidsbron die een constante toon produceert)
- digitale decibelmeter

4. Uitvoering

- Plaats de geluidsbron in een bepaalde ruimte of eventueel buiten. Zorg ervoor dat de afstand tot de geluidsbron goed te variëren is. Zie figuur 3.1.
- Plaats de digitale decibelmeter op een redelijk korte afstand r van de geluidsbron (bijvoorbeeld op 0,50 m) en meet het geluidsniveau op deze plaats.
- Vergroot de afstand r tussen decibelmeter en geluidsbron in vaste stappen en herhaal de meetprocedure. Zorg ervoor dat er een redelijk aantal meetpunten wordt verkregen.



Figuur 3.1: De kwadratenwet.

5. Verwerking

- Verwerk de meetresultaten zoals dit gebruikelijk is. Dit betekent dat meetwaarden gepresenteerd dienen te worden in tabellen en eventuele verbanden tussen grootheden afgeleid moeten worden uit grafieken.
- Zet in een grafiek het geluidsniveau L uit tegen de afstand r . Gebruik voor het maken van de grafiek een spreadsheetprogramma zoals Excel.
- Zet in een grafiek de geluidsintensiteit I uit tegen de afstand r tussen geluidsbron en decibelmeter. Gebruik weer een spreadsheetprogramma.
- Voer met behulp van het spreadsheetprogramma een functiefit uit voor de gemeten verbanden tussen geluidsniveau/geluidsintensiteit en de afstand tussen geluidsbron en decibelmeter. Door middel van een functiefit ga je op zoek naar het wiskundige verband dat er bestaat tussen de onderzochte grootheden.
- Trek aan de hand van de grafieken en functiefit conclusies omtrent de kwadratenwet.

3.2. Uitdemptijd van de akoestische gitaar

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 1.1. Trillingen
- 2.1. Geluidsintensiteit en geluidsniveau
- 2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

Door de snaren op een akoestische gitaar in trilling te brengen, produceert de gitaar geluid. Natuurkundig is dit proces te beschouwen als een energie-omzetting. Door de snaar, met de hand of met een plectrum, in trilling te brengen, wordt arbeid verricht door de gitarist. Hij/zij oefent immers een kracht uit op de snaar en er is daarnaast een verplaatsing te herkennen, de uitwijking die de snaar krijgt. Deze arbeid wordt in eerste instantie omgezet in trillingsenergie, waarna de omzetting naar geluid volgt (hoewel geluid eigenlijk niets meer is dan een bijzondere vorm van trillingsenergie).

De, aan de snaar toegevoerde, energie gaat echter in de loop van de tijd verloren. In de praktijk is dit waar te nemen door het gegeven dat het geluidsniveau in de loop van de tijd afneemt. Hiertoe is de zogenaamde *uitdemptijd* ingevoerd. De uitdemptijd is gedefinieerd als de tijd die de snaar nodig heeft om het oorspronkelijke geluidsniveau (d.w.z. het geluidsniveau op het moment dat de snaar wordt aangeslagen) te reduceren tot 37% van de oorspronkelijke waarde. Er geldt: $L(t_{\text{uitdemp}}) = e^{-1} \cdot L(0) = 0,37 \cdot L(0)$.

Daarbij kan nog worden opgemerkt dat het principe achter de uitdemptijd van een gitaarsnaar ook terugkomt in bijvoorbeeld de ontladingstijd van een condensator.

3. Benodigheden

- akoestische gitaar (eventueel aan te slaan met een plectrum)
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor

4. Uitvoering

- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach ‘Meten en analyseren’ op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de ‘Meetinstelling’ van Coach dusdanig in dat er gedurende 10 seconden geluid kan worden gemeten. Mocht de klank van een snaar sneller uitdempen, dan kan deze meettijd verkort worden. Stel de meetfrequentie zo hoog mogelijk in.
- Start de meting en sla de snaar aan.
- Bepaal uit het verkregen diagram de uitdemptijd van de snaar. Hierbij kan het nodig zijn een gedeelte van het diagram vergroot weer te geven.
- Bepaal door middel van Fourier-analyse de frequentie van de toon die wordt voortgebracht door de aangeslagen snaar.
- Herhaal deze meetprocedure voor de zes snaren op de gitaar.

5. Verwerking

- Verwerk de meetresultaten op een overzichtelijke wijze in een tabel.
- Teken een grafiek waarin de uitdemptijd (in s) staat uitgezet tegen de frequentie (in Hz). Plaats de uitdemptijd op de verticale as en de frequentie op de horizontale as.
- Bekijk of er een verband bestaat tussen de uitdemptijd en de frequentie. Voer eventueel een functiefit uit.
- Vergelijk de resultaten met de resultaten van het experiment ‘uitdemptijd van de elektrische gitaar’ (experiment 3.3.).

3.3. Uitdemptijd van de elektrische gitaar

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 1.1. Trillingen
- 2.1. Geluidsintensiteit en geluidsniveau
- 2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

Door de snaren op een elektrische gitaar in trilling te brengen, produceert de gitaar geluid. Natuurkundig is dit proces te beschouwen als een energie-omzetting. Door de snaar, met de hand of met een plectrum, in trilling te brengen, wordt arbeid verricht door de gitarist. Hij/zij oefent immers een kracht uit op de snaar en er is daarnaast een verplaatsing te herkennen, de uitwijking die de snaar krijgt. Deze arbeid wordt in eerste instantie omgezet in trillingsenergie, waarna de omzetting naar een elektrisch signaal volgt. Met een versterker kan dit elektrisch signaal weer worden omgezet in geluid.

De, aan de snaar toegevoerde, energie gaat echter in de loop van de tijd verloren. In de praktijk is dit waar te nemen door het gegeven dat het geluidsniveau in de loop van de tijd afneemt. Hiertoe is de zogenaamde *uitdemptijd* ingevoerd. De uitdemptijd is gedefinieerd als de tijd die de snaar nodig heeft om het oorspronkelijke geluidsniveau (d.w.z. het geluidsniveau op het moment dat de snaar wordt aangeslagen) te reduceren tot 37% van de oorspronkelijke waarde. Er geldt: $L(t_{\text{uitdemp}}) = e^{-1} \cdot L(0) = 0,37 \cdot L(0)$.

Daarbij kan nog worden opgemerkt dat het principe achter de uitdemptijd van een gitaarsnaar ook terugkomt in bijvoorbeeld de ontladingstijd van een condensator.

3. Benodigheden

- elektrische gitaar (eventueel aan te slaan met een plectrum) met versterker
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor

4. Uitvoering

- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach ‘Meten en analyseren’ op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de ‘Meetinstelling’ van Coach dusdanig in dat er gedurende 10 seconden geluid kan worden gemeten. Mocht de klank van een snaar sneller of langzamer uitdempen, dan kan deze meettijd veranderd worden. Stel de meetfrequentie zo hoog mogelijk in.
- Start de meting en sla de snaar aan.
- Bepaal uit het verkregen diagram de uitdemptijd van de snaar. Hierbij kan het nodig zijn een gedeelte van het diagram vergroot weer te geven.
- Bepaal door middel van Fourier-analyse de frequentie van de toon die wordt voortgebracht door de aangeslagen snaar.
- Herhaal deze meetprocedure voor de zes snaren op de gitaar.

5. Verwerking

- Verwerk de meetresultaten op een overzichtelijke wijze in een tabel.
- Teken een grafiek waarin de uitdemptijd (in s) staat uitgezet tegen de frequentie (in Hz). Plaats de uitdemptijd op de verticale as en de frequentie op de horizontale as.
- Bekijk of er een verband bestaat tussen de uitdemptijd en de frequentie. Voer eventueel een functiefit uit.
- Vergelijk de resultaten met de resultaten van het experiment ‘uitdemptijd van de akoestische gitaar’ (experiment 3.2.).

3.4. Nagalmtijd

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 1.1. Trillingen
- 1.4. Geluidstrillingen en -golven
- 2.1. Geluidsintensiteit en geluidsniveau

2. Inleiding

Een geluidsbron, opgesteld in een ruimte, produceert (trillings)energie. Deze energie wordt met behulp van de uitgezonden geluidsgolven de ruimte in gebracht. In een ruimte komt de geluidsgolf echter allerlei obstakels tegen, waaronder de wanden, vloeren en het plafond van de ruimte. Op deze obstakels verliest de geluidsgolf een gedeelte van zijn energie door middel van absorptie. Het geluid sterft hierdoor na verloop van tijd uit.

De tijd waarin de uitgezonden geluidsgolven een bepaald deel van hun energie kwijt raken, wordt ook wel de *nagalmtijd* genoemd. Vaak is het gewenst dat de nagalmtijd zo klein mogelijk is. In geluidsstudio's zorgt men ervoor dat de wanden en de vloer bekleed zijn met geluidsabsorberend (zacht) materiaal. Daar waar in een ruimte sprake is van veel harde materialen kan de nagalmtijd een aanzienlijke waarde hebben. Denk hierbij maar eens aan het geluid in een badkamer of een kerk. Hier is veel meer 'echo' door een grote nagalmtijd. De nagalmtijd is gedefinieerd als de tijd die de een geluidsgolf nodig heeft om het oorspronkelijke geluidsniveau (d.w.z. het geluidsniveau op het moment van uitzenden van de geluidsgolf) te reduceren tot 37% van de oorspronkelijke waarde. Er geldt:

$$L(t_{\text{nagalm}}) = e^{-1} \cdot L(0) = 0,37 \cdot L(0)$$

Daarbij kan nog worden opgemerkt dat het principe achter de nagalmtijd bijvoorbeeld ook voorkomt bij de ontlading van een condensator of het uitdempen van een snaar.

3. Benodigheden

- ruimte met veel 'hard' materiaal (bijvoorbeeld een toiletruimte)
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor

4. Uitvoering

- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach 'Meten en analyseren' op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de 'Meetinstelling' van Coach dusdanig in dat er gedurende 10 seconden geluid kan worden gemeten. Stel de meetfrequentie in op een voldoende hoge waarde (hoewel dat niet strikt noodzakelijk is).
- Plaats de geluidsensor in een ruimte met veel hard materiaal (bijvoorbeeld een toiletruimte). In zo'n ruimte is de nagalmtijd aanzienlijk en daarom goed meetbaar.
- Start de meting en produceer in korte tijd een hard geluid. Een hoog geluidsniveau van de geluidsbron bij de start van de meting is belangrijk voor een betrouwbare meting. Het geluid mag niet te lang duren, maar moet bestaan uit bijvoorbeeld een harde klap.
- Herhaal de proef een aantal maal om een betrouwbaar eindresultaat te krijgen.

5. Verwerking

- Bepaal uit het, met Coach6 verkregen, (U, t) -diagram (de elektrische spanning U van de geluidsensor uitgezet tegen de tijd t) de nagalmtijd. Doe dit voor alle uitgevoerde metingen en bereken de gemiddelde nagalmtijd.
- Herhaal het experiment eventueel voor een andere ruimte.

3.5. Bepaling van de geluidssnelheid

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 1.3. Lopende golven
- 1.8. Staande golven in luchtkolommen

2. Inleiding

Een *golf* is het gevolg van een *trilling*. Doordat er op een bepaald punt een trilling plaatsvindt, kan het mogelijk zijn dat er een golf gaat lopen. In de praktijk bestaan er twee soorten golven: transversale golven (de voortplantingsrichting en de uitwijklingsrichting staan loodrecht op elkaar) en longitudinale golven (de voortplantingsrichting en de uitwijklingsrichting staan in dezelfde richting).

Geluidsgolven zijn longitudinale golven. De verdichtingen en verdunningen die bij een geluidsgolf van toepassing zijn, brengen ons trommelvlies in trilling waardoor we geluid kunnen horen. Met betrekking tot golven geldt het volgende verband:

$$v = \lambda \cdot f$$

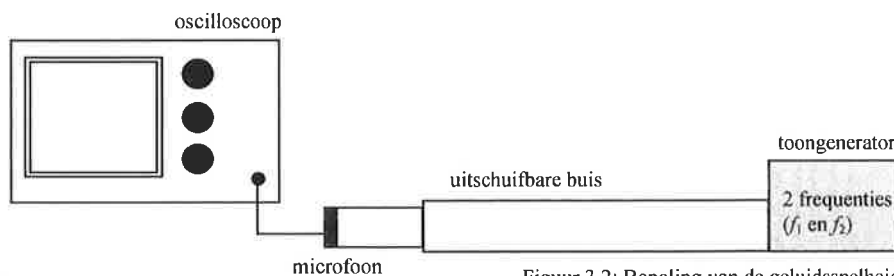
Hierin is v de golfsnelheid (in m/s), λ de golflengte (in m) en f de frequentie (in Hz). Voor geluidsgolven wordt de golfsnelheid ook wel de geluidssnelheid genoemd.

3. Benodigdheden

- opstelling zoals weergegeven in figuur 3.2.
- oscilloscoop
- patroon met lachgas en/of koolstofdioxide

4. Uitvoering

- Bouw de opstelling zoals weergegeven in figuur 3.2.



- Stel de frequentie van de toongenerator in op frequentie f_1 en schuif de buis met de microfoon in de andere buis. Bekijk op de oscilloscoop hoe het geluidsniveau toeneemt en afneemt. Bepaal de posities waar de uitwijking op de oscilloscoop maximaal is. Op deze positie past er een staande golf exact in de buis waardoor er resonantie optreedt.
- Herhaal dit experiment voor frequentie f_2 op de toongenerator.
- Spuit een hoeveelheid lachgas (N_2O) of koolstofdioxide (CO_2) in de buis en herhaal het experiment voor frequentie f_1 op de toongenerator.
- Spuit een hoeveelheid lachgas (N_2O) of koolstofdioxide (CO_2) in de buis en herhaal het experiment voor frequentie f_2 op de toongenerator.

5. Verwerking

- Geef de verkregen meetwaarden weer in een overzichtelijke tabel.
- Bereken uit de meetgegevens de golflengten van de geluidsgolven in de vier gemeten situaties.
- Bereken de geluidssnelheid in lucht (bij kamertemperatuur) en in lachgas of koolstofdioxide (bij kamertemperatuur).

3.6. Gehoorbescherming

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

2.1. Geluidsintensiteit en geluidsniveau

2. Inleiding

Om het volume van geluid vast te leggen, zijn twee grootheden ingevoerd: de *geluidsintensiteit* en het *geluidsniveau*. Naarmate een waarnemer verder van een geluidsbron verwijderd is, zullen beide grootheden in waarde afnemen.

Over het algemeen is het geluidsniveau de waarde waarvan gebruik wordt gemaakt in de praktijk. Grote geluidsniveaus zijn onwenselijk. Door een toevoer van een te grote hoeveelheid (trillings)energie aan het trommelveel kan dit blijvend beschadigd raken. Men probeert dan ook om het geluidsniveau zoveel mogelijk te beperken. Dit kan gerealiseerd worden bij de geluidsbron en bij de ontvanger van het geluid.

Veelal wordt er gebruik gemaakt van geluidsabsorptie en/of geluidsreflectie. Mensen die bijvoorbeeld in hun werk worden blootgesteld aan hoge geluidsniveaus dragen vaak gehoorbescherming, zoals bijvoorbeeld is weergegeven in figuur 3.3. Zo'n bescherming bestaat meestal uit een flexibele stof die in het oor gebracht kan worden en die de gehoorgang grotendeels afsluit. Een inkomende geluidsgolf wordt door de stof deels geabsorbeerd waardoor sterke verzwakking van het geluidsniveau optreedt.



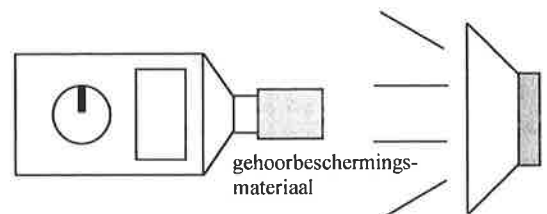
Figuur 3.3: Gehoorbescherming.

3. Benodigheden

- toongenerator
- digitale decibelmeter
- materiaal voor gehoorbescherming (watten, rubber of gehoordoppen)

4. Uitvoering

- Sluit een luidspreker aan op een toongenerator.
- Plaats op de digitale decibelmeter een buisje waarin gehoorbeschermingsmateriaal gebracht kan worden. Maak de opstelling zoals weergegeven in figuur 3.4.
- Stel de toongenerator in op een bepaalde frequentie en een bepaald geluidsniveau. Meet het geluidsniveau met en zonder gehoorbeschermingsmateriaal. Meet het volledige geluidsspectrum door (dus frequenties van 20 Hz tot 20 kHz).
- Voer het experiment nogmaals uit, gebruik makend van twee andere materialen voor gehoorbescherming.



Figuur 3.4: Opstelling gehoorbescherming.

5. Verwerking

- Maak een overzichtelijke tabel van de meetresultaten. Geef de blanco-proef weer (dus zonder gehoorbeschermingsmateriaal), het experiment met watten en de experimenten met de andere materialen.
- Teken een grafiek waarin het geluidsniveau staat uitgezet tegen de frequentie. Gebruik voor de frequentie-as een logaritmische schaal.
- Trek conclusies uit de grafiek.

3.7. Experiment van Melde

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

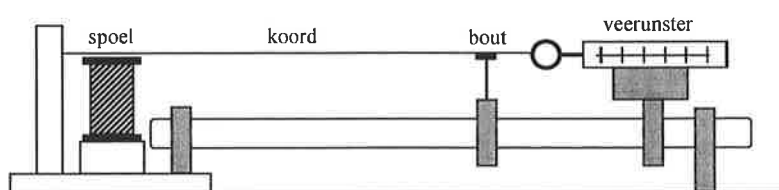
1.7. Staande golven in snaren

2. Inleiding

Als aan het uiteinde van een koord een trilling wordt uitgevoerd, zal er in het koord een lopende golf ontstaan. Deze golf zal op een bepaald moment het uiteinde van het koord bereiken en zal hier gereflecteerd worden. Heengaande golf en gereflecteerde golf zullen interfereren waardoor onder bepaalde voorwaarden een *staande golf* in het koord kan ontstaan. Voor een koord met twee vaste uiteinden geldt dan de voorwaarde: $l = n \cdot \frac{1}{2} \lambda$. In deze vergelijking is l de lengte van het koord (in m), λ de golflengte (in m) en n een telwaarde ($n = 1, 2$, enz.).

In dit experiment wordt gebruik gemaakt van de opstelling zoals weergegeven in figuur 3.5.

Het koord is aan één zijde bevestigd aan een trillend plaatje. De uitwijking van dit trillende plaatje is zo gering dat dit uiteinde als een vast uiteinde beschouwd mag worden. Aan de andere zijde rust het koord op een bout waardoor ook daar een vast uiteinde aanwezig is.



Figuur 3.5: Experiment van Melde.

3. Benodigheden

- opstelling zoals weergegeven in figuur 3.5
- voeding (wisselspanning) voor het in trilling brengen van het koord
- 3 koorden (met verschillende massadichtheid)

4. Uitvoering

- Zorg ervoor dat de lengte van een koord 50 cm bedraagt en dat de veerunster 0 N aangeeft. Het trillplaatje moet nauwelijks zichtbaar trillen (met een frequentie f van 100 Hz).
- Schuif voorzichtig de klem met de veerunster naar achteren totdat er knopen en buiken zichtbaar worden. Schuif vervolgens een klein beetje heen en weer zodat de amplitudo maximaal wordt. Bepaal de golflengte λ (in m).
- Lees, in de stand waarin de staande golf optreedt, de spankracht F_{span} (in N) af.
- Verschuif de veerunster weer totdat de volgende staande golf zichtbaar optreedt en meet weer de golflengte. Probeer (zo mogelijk) drie toestanden te vinden waarbij een staande golf optreedt.
- Herhaal het experiment voor de andere twee koorden.

5. Verwerking

- Geef de verkregen meetresultaten weer in (een) overzichtelijke tabel(len).
- Bereken voor alle mogelijke staande golven de golfsnelheid v (in m/s).
- Teken een grafiek waarin de golfsnelheid v (in m/s) staat uitgezet tegen de spankracht F_{span} (in N).
- Teken een grafiek waarin de golfsnelheid in het kwadraat v^2 (in m^2/s^2) staat uitgezet tegen de spankracht F_{span} (in N).
- Trek conclusies uit de verkregen grafieken. Ga op zoek naar een verband tussen de golfsnelheid v en de spankracht F_{span} .

3.8. Frequentie-analyse van muziekinstrumenten

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 1.7. Staande golven in snaren
- 1.8. Staande golven in luchtkolommen
- 2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

Ieder muziekinstrument heeft zijn eigen specifieke klankkleur. Kinderen zijn vaak al op jonge leeftijd in staat bepaalde muziekinstrumenten te herkennen aan hun klank. Als op verschillende instrumenten dezelfde toonhoogte (dezelfde frequentie) wordt gespeeld, zijn deze instrumenten toch goed van elkaar te onderscheiden. Grote orkesten maken van deze eigenschap dankbaar gebruik.

De frequentie van een toon die door een instrument geproduceerd wordt en die de toonhoogte van de klank bepaald, wordt ook wel de *grondfrequentie* genoemd. Naast deze grondfrequentie bestaat de klank echter nog uit talloze andere frequenties, de zogenaamde *boventonen*. Deze boventonen bepalen de klankkleur (het timbre) van een instrument en zij zijn er dan ook verantwoordelijk voor dat we onderscheid kunnen maken tussen verschillende muziekinstrumenten.

3. Benodigheden

- diverse muziekinstrumenten (liefst totaal verschillend) of keyboard
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor

4. Uitvoering

- Kies een aantal muziekinstrumenten die sterk van elkaar verschillen met betrekking tot hun klankkleur (timbre). Het karakter van de klank moet liefst totaal verschillend zijn. Eventueel kan er ook voor gekozen worden de klanken van instrumenten te gebruiken die gesampled zijn in een keyboard of synthesizer. Kies overigens géén slaginstrumenten.
- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach 'Meten en analyseren' op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de 'Meetinstelling' van Coach dusdanig in dat er gedurende 5 seconden geluid kan worden gemeten. Stel de meetfrequentie in op een voldoende hoge waarde.
- Neem het geluid van een gekozen instrument op in Coach.
- Bepaal door middel van Fourier-analyse de grondfrequentie van de toon die wordt voortgebracht door het instrument. Maak ook een analyse van de diverse boventonen.
- Herhaal deze meetprocedure voor een aantal (bijvoorbeeld drie) andere instrumenten. Zorg er echter wel steeds voor dat het instrument dezelfde toon (dezelfde grondfrequentie) produceert, anders is de vergelijking te onbetrouwbaar.

5. Verwerking

- Analyseer de frequentiespectra van de diverse instrumenten.
- Noteer overeenkomsten en verschillen tussen de frequentiespectra van de instrumenten. Voer deze notatie op een overzichtelijke wijze uit (bijvoorbeeld in tabelvorm).
- Probeer een link te leggen tussen de resultaten en de klankkleur van een instrument.

3.9. De menselijke stem: oooh – aaah – iiih

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 1.1. Trillingen
- 2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

De menselijke stem is in staat een groot spectrum aan tonen voort te brengen. De laagst mogelijk te produceren tonen liggen bij een frequentie van 20 Hz, terwijl de hoogste tonen voorbij 5 kHz kunnen liggen. Daarnaast is het mogelijk om met het menselijk stemapparaat zeer diverse klanken voort te brengen. Onze stembanden zijn een bijzonder nauwkeurig orgaan, waarmee de meest complexe trillingen zijn uit te voeren en waarmee dus ook de meest complexe tonen (wat betreft frequentiespectrum) zijn te produceren.

Woorden krijgen hun klankkleur door voornamelijk de klinkers (*a, e, i, o, u*) die in het woord gebruikt worden. De klankkleur van deze klinkers kan onderzocht worden.

3. Benodigdheden

- proefpersoon (liefst iemand die redelijk toonvast is)
- stemvork of keyboard (om een zo zuiver mogelijke toon te zingen)
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor

4. Uitvoering

- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach ‘Meten en analyseren’ op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de ‘Meetinstelling’ van Coach dusdanig in dat er gedurende 5 seconden geluid kan worden gemeten. Stel de meetfrequentie in op een voldoende hoge waarde.
- Laat de proefpersoon de ‘oooh’-klank produceren met een bepaalde toonhoogte. Deze toonhoogte kun je bereiken door mee te zingen met de toon van een stemvork of een keyboard (beide apparaten zijn nagenoeg perfect gestemd). Het is belangrijk de gekozen toonhoogte tijdens het hele experiment gelijk te houden. Neem het geluid van een gekozen klank op in Coach.
- Bepaal door middel van Fourier-analyse de grondfrequentie van de toon die wordt voortgebracht door de stem. Maak ook een analyse van de diverse boventonen.
- Herhaal deze meetprocedure voor de klanken ‘aaah’ en ‘iiih’. Zorg er echter wel steeds voor dat de proefpersoon dezelfde toon (dezelfde grondfrequentie) produceert, anders is de vergelijking onbetrouwbaar.

5. Verwerking

- Analyseer de frequentiespectra van de drie klanken.
- Noteer overeenkomsten en verschillen tussen de frequentiespectra van de klanken ‘oooh’, ‘aaah’ en ‘iiih’. Voer deze notatie op een overzichtelijke wijze uit (bijvoorbeeld in tabelvorm).
- Probeer een link te leggen tussen de resultaten en de klankkleur van de geproduceerde klank.
- Probeer in te schatten hoe de frequentiespectra van klanken als ‘uuuh’, ‘eeeh’, ‘èèèh’, ‘ooee’, ‘uuii’, enz. er uit zullen zien. Voer eventueel nog een aantal extra metingen uit op de manier zoals in dit experiment beschreven.

3.10. Frequentie-analyse van effectapparatuur

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

Ieder muziekinstrument heeft zijn eigen specifieke klank. Muzikanten zijn echter vaak toch steeds op zoek naar nieuwe mogelijkheden op hun instrument. Hiertoe is er dan ook zeer diverse effectapparatuur (zie figuur 3.6) ontwikkeld en te koop.

Vooral gitaristen en toetsenisten zijn liefhebbers van deze elektronica. Ook studietechnici maken veel gebruik van effecten, hoewel het zich hier meestal beperkt tot het inpassen van een extra echo (reverb). Het geheel krijgt hierdoor een grotere nagalmtijd, waardoor er een 'vollere' klank ontstaat.

Effectapparatuur wijzigt het frequentiespectrum van een klank dusdanig dat er een geheel nieuw timbre ontstaat. Alom bekend is het 'distortion'- of 'overdrive'-effect voor gitaristen, waarbij het bekende rock/metal-geluid van de gitaar ontstaat. Ook een effect als de 'octaver' wordt vaak gebruikt. Dit effect voegt tonen toe aan de oorspronkelijke klank die één of twee octaven hoger of lager liggen dan de gespeelde toon. Dit geeft het idee dat er meerdere gitaristen tegelijkertijd spelen.



Figuur 3.6: Effectapparatuur.

3. Benodigdheden

- elektrische gitaar met diverse effectapparatuur (of opnamen hiervan) of keyboard
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor

4. Uitvoering

- Kies een aantal vormen van effectapparatuur (bijvoorbeeld de 'distortion' of 'octaver'). Een opname van een gitarist die de apparatuur toepast volstaat ook. Let er wel op dat je slechts één toon analyseert, anders wordt het signaal te complex.
- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach 'Meten en analyseren' op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de 'Meetinstelling' van Coach dusdanig in dat er gedurende 5 seconden geluid kan worden gemeten. Stel de meetfrequentie in op een voldoende hoge waarde.
- Neem het geluid van de gitaar zonder en met de effectapparatuur op in Coach.
- Bepaal door middel van Fourier-analyse de grondfrequentie van de toon die wordt voortgebracht door het instrument. Maak ook een analyse van de diverse boventonen.
- Herhaal deze meetprocedure voor andere effectapparatuur. Zorg er echter wel steeds voor dat dezelfde toon (dezelfde grondfrequentie) wordt gespeeld, anders is de vergelijking onbetrouwbaar.

5. Verwerking

- Analyseer de frequentiespectra van de diverse effectapparatuur.
- Noteer overeenkomsten en verschillen tussen de frequentiespectra van de effecten. Voer deze notatie op een overzichtelijke wijze uit (bijvoorbeeld in tabelvorm).
- Probeer een link te leggen tussen de resultaten en de klankkleur die ontstaat bij gebruik van de betreffende effectapparatuur.

3.11. Frequentie-analyse: akoestisch versus gesampled

1. Voorbereiding

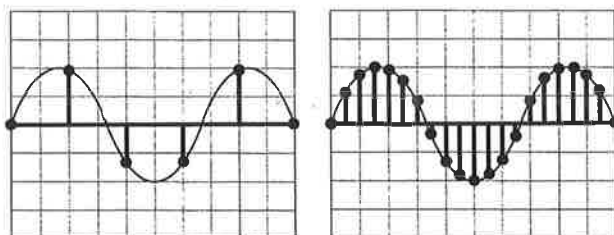
Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

De vaardigheid een akoestisch instrument te bespelen is tegenwoordig eigenlijk niet meer nodig om muzikant te zijn. Iemand die in staat is een piano en/of synthesizer te bespelen, kan ieder ander instrument imiteren.

In keyboards en synthesizers bevinden zich geluiden die gesampled zijn. Dit betekent dat men de trilling $((u,t)$ -diagram) van een akoestisch instrument bepaald heeft en dit signaal heeft bemonsterd. Voor een harmonische trilling (zuivere toon) staat dit, als



Figuur 3.7: Sampling.

voorbeeld, weergegeven in figuur 3.7. In de afgelopen 20 jaar is de maximaal haalbare bemonsteringsfrequentie echter sterk toegenomen. Een hogere bemonsteringsfrequentie heeft tot gevolg dat het oorspronkelijke signaal steeds beter te benaderen is. Dit heeft weer tot gevolg gehad dat klanken in keyboards steeds beter het oorspronkelijke signaal benaderen en nog nauwelijks van echt te onderscheiden zijn.

3. Benodigheden

- akoestisch instrument (of opname hiervan)
- keyboard (liefst zo eenvoudig mogelijk)
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor

4. Uitvoering

- Kies een akoestisch instrument dat ook gesampled te vinden is op een keyboard. Een opname van het instrument volstaat ook. Let er wel op dat je slechts één toon analyseert, anders wordt het signaal te complex.
- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach 'Meten en analyseren' op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de 'Meetinstelling' van Coach dusdanig in dat er gedurende 5 seconden geluid kan worden gemeten. Stel de meetfrequentie in op een voldoende hoge waarde.
- Neem het geluid van het akoestische instrument en de weergave op het keyboard van dit instrument op in Coach. Neem wel dezelfde toon (dezelfde grondfrequentie) op.
- Bepaal door middel van Fourier-analyse de grondfrequentie van de toon die wordt voortgebracht door het instrument. Maak ook een analyse van de diverse boventonen.
- Herhaal deze meetprocedure voor een ander instrument.

5. Verwerking

- Analyseer de frequentiespectra van de akoestische klank en de klank op het keyboard.
- Noteer overeenkomsten en verschillen tussen de frequentiespectra van de klanken. Voer deze notatie op een overzichtelijke wijze uit (bijvoorbeeld in tabelvorm).
- Onderzoek wat er zou moeten gebeuren om de klank van het keyboard (verder) te verbeteren.

3.12. Frequentie-analyse van vergelijkbare instrumenten

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

Ieder muziekinstrument heeft zijn eigen specifieke klankkleur. Als op verschillende instrumenten dezelfde toon (dezelfde toonhoogte, dus dezelfde frequentie) wordt gespeeld, zijn deze instrumenten vaak goed van elkaar te onderscheiden. Er bestaan echter instrumenten die gebaseerd zijn op een zelfde principe. Van bepaalde instrumenten bestaan zelfs meerdere uitvoeringen. Hierbij valt te denken aan: viool en altviool, trompet en trombone, klarinet en saxofoon, metaalsnarige gitaar en nyloonsnarige gitaar, blokfluit en dwarsfluit, sopraansaxofoon en tenorsaxofoon, enz.

De frequentie van een toon die door een instrument geproduceerd wordt en die de hoogte van de klank bepaald, wordt ook wel de *grondfrequentie* genoemd. Naast deze grondfrequentie bestaat de klank echter nog uit talloze andere frequenties, de zogenaamde *boventonen*. Deze boventonen bepalen de klankkleur (het timbre) van een instrument en zij zijn er dan ook verantwoordelijk voor dat we onderscheid kunnen maken tussen verschillende muziekinstrumenten. Als twee instrumenten echter berusten op een vergelijkbaar principe zullen de verschillen in boventonen heel subtiel zijn. Om toch verschil te kunnen meten in de frequentiespectra van de klanken is een goede analyse absoluut noodzakelijk.

3. Benodigdheden

- twee vergelijkbare muziekinstrumenten (eventueel d.m.v. keyboard of opname)
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor

4. Uitvoering

- Kies twee muziekinstrumenten die sterk op elkaar lijken met betrekking tot hun klankkleur (timbre). Eventueel kan er ook voor gekozen worden de klanken van instrumenten te gebruiken die gesampled zijn in een keyboard of synthesizer. Kies overigens géén slaginstrumenten.
- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach ‘Meten en analyseren’ op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de ‘Meetinstelling’ van Coach dusdanig in dat er gedurende 5 seconden geluid kan worden gemeten. Stel de meetfrequentie in op een voldoende hoge waarde.
- Neem het geluid van een gekozen instrument op in Coach.
- Bepaal door middel van Fourier-analyse de grondfrequentie van de toon die wordt voortgebracht door het instrument. Maak ook een analyse van de diverse boventonen.
- Herhaal deze meetprocedure voor het vergelijkbare instrument. Zorg er echter wel voor dat het instrument dezelfde toon (dezelfde grondfrequentie) produceert, anders is de vergelijking onbetrouwbaar.

5. Verwerking

- Analyseer de frequentiespectra van de twee instrumenten.
- Noteer overeenkomsten en verschillen tussen de frequentiespectra van de instrumenten. Voer deze notatie op een overzichtelijke wijze uit (bijvoorbeeld in tabelvorm).
- Probeer een link te leggen tussen de resultaten en de klankkleur van een instrument.
- Kies eventueel nog twee vergelijkbare instrumenten en herhaal de procedure.

3.13. Frequentie-analyse van de blokfluit

1. Voorbereiding

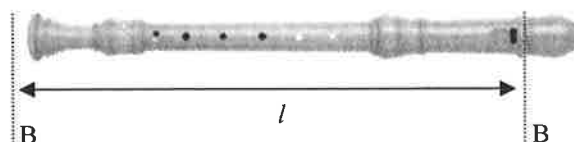
Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 1.7. Staande golven in luchtkolommen
- 2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

Als kinderen op jonge leeftijd aan de slag willen met muziek wordt er vaak gekozen voor de blokfluit als een eerste instrument. Een blokfluit is redelijk eenvoudig te bespelen en er is relatief weinig lucht voor nodig om een goede toon te krijgen (dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld een trompet of een saxofoon).

Als een blokfluit wordt aangeblazen, wordt er een luchtstroom gecreëerd over een redelijk scherpe rand. Hierdoor ontstaat een soort van trillingsbron. De staande golf die in de blokfluit ontstaat, heeft in ieder geval één buik vlakbij het mondstuk en één buik ligt iets buiten de monding van de fluit, zie figuur 3.8.



Figuur 3.8: Een blokfluit met twee buiken aan de uiteinden.

De staande golf wordt veroorzaakt door interferentie van de heengaande golf (van mondstuk naar monding) met de gereflecteerde golf (van monding terug naar mondstuk). De golven die door de fluitist worden veroorzaakt bestaan uit geluidsgolven. Deze golven verplaatsen zich met de geluidssnelheid. De geluidssnelheid kan berekend worden met de formule:

$$v = C \cdot \sqrt{T}$$

In deze formule staat v voor de geluidssnelheid (in m/s), T voor de temperatuur (in K) en C voor een constante ($C = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1/2}$).

3. Benodigdheden

- blokfluit
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor

4. Uitvoering

- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach ‘Meten en analyseren’ op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de ‘Meetinstelling’ van Coach dusdanig in dat er gedurende 5 seconden geluid kan worden gemeten. Stel de meetfrequentie in op een voldoende hoge waarde.
- Houd alle gaatjes van de blokfluit gesloten en speel de toon. Neem dit op in Coach.
- Bepaal door middel van Fourier-analyse de grondfrequentie van de toon die wordt voortgebracht door het instrument. Maak ook een analyse van de diverse boventonen.
- Herhaal deze meetprocedure voor twee andere tonen op de blokfluit.

5. Verwerking

- Bepaal zo nauwkeurig mogelijk de grondfrequentie van de tonen.
- Bereken de van toepassing zijnde geluidssnelheid.
- Bereken de golflengte van de geproduceerde tonen.
- Bepaal de exacte ligging van de buik bij de monding van de blokfluit. Bepaal of deze buik exact bij de monding ligt, iets buiten fluit of iets binnen de fluit.

3.14. Duimpiano

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 1.7. Staande golven in snaren
- 2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

Snaarinstrumenten produceren een klank door het voorkomen van staande golven in de snaar. Door de lengte van de snaar te variëren passen er meer of minder veelvouden van een halve golflengte ($\frac{1}{2}\lambda$) op de snaar waardoor de frequentie van de toon verandert. Hierbij wordt er dan wel van uitgegaan dat de golfsnelheid v (de snelheid waarmee de golf zich door de snaar verplaatst) constant blijft. Er geldt immers: $v = \lambda \cdot f$. Een staande golf met een veelvoud van een $\frac{1}{2}\lambda$ op de snaar geldt echter alleen als er sprake is van twee vaste uiteinden. Aan een vast uiteinde bevindt zich immers een knoop en de afstand tussen twee opeenvolgende knopen bedraagt $\frac{1}{2}\lambda$.

Als er sprake is van een los uiteinde bij een snaar zal zich daar een buik bevinden van de staande golf. Op een snaar met één vast en één los uiteinde past dus een staande golf die bestaat uit een (oneven) veelvoud van $\frac{1}{4}\lambda$ (de afstand van knoop tot buik). In de praktijk komt de situatie met één vast en één los uiteinde echter nauwelijks voor. Bijna alle snaarinstrumenten maken gebruik van snaren die ingeklemd zijn tussen twee punten. Een uitzondering hierop vormt de *duimpiano* uit figuur 3.9. Dit, van origine Afrikaanse, instrument wordt veel gebruikt in allerlei vormen van wereldmuziek.



Figuur 3.9: Duimpiano.

3. Benodigheden

- duimpiano
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor
- stroboscoop

4. Uitvoering

- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach 'Meten en analyseren' op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de 'Meetinstelling' van Coach dusdanig in dat er gedurende 3 seconden geluid kan worden gemeten. Stel de meetfrequentie in op een voldoende hoge waarde.
- Sla een toets van de duimpiano aan en neem het geluid op in Coach. Let daarbij goed op de tijd want het geluid van een duimpiano dooft snel uit.
- Bepaal door middel van Fourier-analyse de grondfrequentie van de toon die wordt voortgebracht door het instrument. Maak ook een analyse van de diverse boventonen.
- Herhaal deze meetprocedure voor twee andere toetsen op de duimpiano.
- Belicht de duimpiano met een oscilloscoop en sla nogmaals de toetsen aan. Bekijk hoe de staande golf in de toets is opgebouwd (als veelvoud van $\frac{1}{4}\lambda$).

5. Verwerking

- Bepaal de golflengte van de staande golf in de toetsen van de duimpiano.
- Bereken de golfsnelheid van de golf in de toets van de duimpiano.

3.15. Golfsnelheid in een gitaarsnaar

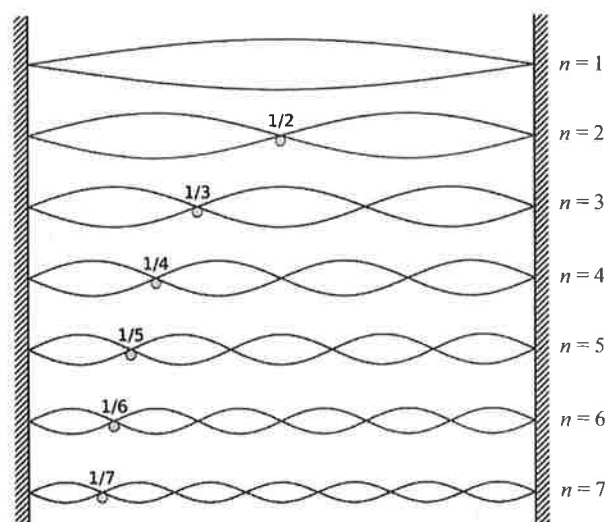
1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 1.7. Staande golven in snaren
- 2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

Snaarinstrumenten produceren een klank door het voorkomen van staande golven in de snaar. Door de lengte van de snaar te variëren passen er meer of minder veelvouden van een halve golflengte ($\frac{1}{2}\lambda$) op de snaar waardoor de frequentie van de toon veranderd, zie figuur 3.10. Hierbij wordt er dan wel van uitgegaan dat de golfsnelheid v (de snelheid waarmee de golf zich door de snaar verplaatst) constant blijft. Er geldt immers: $v = \lambda \cdot f$. Een staande golf met een veelvoud van een $\frac{1}{2}\lambda$ op de snaar geldt echter ook alleen als er sprake is van twee vaste uiteinden. Aan een vast uiteinde bevindt zich een knoop en de afstand tussen twee opeenvolgende knopen bedraagt $\frac{1}{2}\lambda$.



Figuur 3.10: Staande golven in een snaar.

Een gitaarsnaar produceert na aanslag over het algemeen zijn grondtoon. De frequentie van deze toon is te veranderen door de lengte van de snaar te wijzigen. Hierdoor verandert de golflengte λ en zal de spanning in de gitaarsnaar ook veranderen. Hierdoor verandert dan weer de golfsnelheid v in de snaar. Ook het materiaal van de snaar bepaalt van welke golfsnelheid er in de snaar sprake zal zijn. Het veranderen van het snaarmateriaal is natuurlijk niet realistisch tijdens het bespelen van de gitaar.

3. Benodigheden

- akoestische gitaar
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor
- stroboscoop

4. Uitvoering

- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach ‘Meten en analyseren’ op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de ‘Meetinstelling’ van Coach dusdanig in dat er gedurende 5 seconden geluid kan worden gemeten. Stel de meetfrequentie in op een voldoende hoge waarde.
- Sla een losse snaar aan op de gitaar en neem het geluid op in Coach.
- Bepaal door middel van Fourier-analyse de grondfrequentie van de toon die wordt voortgebracht door de snaar. Maak ook een analyse van de diverse boventonen.
- Herhaal deze meetprocedure voor de vijf andere snaren van de gitaar.
- Belicht de gitaar vervolgens met een oscilloscoop en sla nogmaals de snaren aan. Bekijk hoe de staande golf in de snaar is opgebouwd (als veelvoud van $\frac{1}{2}\lambda$).

5. Verwerking

- Bepaal de golflengte van de staande golf in de zes snaren van de gitaar.
- Bereken de golfsnelheid van de golf in de snaren van de gitaar.

3.16. Frequentie-analyse van de didgeridoo

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 1.8. Staande golven in luchtkolommen
- 2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

Blaasinstrumenten produceren een klank door het voorkomen van staande golven in de luchtkolom van het instrument. Bij metingen aan blaasinstrumenten wordt er vanuit gegaan dat de golfsnelheid v (de snelheid waarmee de golf zich door het instrument verplaatst) constant blijft. Een staande golf met een veelvoud van een $\frac{1}{4}\lambda$ in de luchtkolom geldt echter alleen als er sprake is van een gesloten uiteinde en een open uiteinde. Bij een gesloten uiteinde bevindt zich immers een knoop en bij een open uiteinde een buik. De afstand van een knoop naar een buik bedraagt $\frac{1}{4}\lambda$.

Als er sprake is van een luchtkolom met een open en een gesloten uiteinde treedt er een staande golf op die bestaat uit een (oneven) veelvoud van $\frac{1}{4}\lambda$ (de afstand van knoop tot buik). Er geldt:

$$l = (2n - 1) \cdot \frac{1}{4}\lambda$$

In deze formule staat l voor de lengte van de luchtkolom is (in m), λ voor de golflengte (in m) en n voor een telwaarde ($n = 1, 2, 3$, enz.).

Een niet alledaags instrument is de didgeridoo, zie figuur 3.11). Dit Australische blaasinstrument produceert een lage, brommende toon en wordt ook wel het oudste instrument op aarde genoemd. Door de buislengte van een didgeridoo te variëren, kan de toonhoogte (frequentie) gewijzigd worden.



Figuur 3.11: Didgeridoo.

3. Benodigheden

- didgeridoo (pvc-buis (lengte $\approx 1,5$ m) met mondstuk)
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor

4. Uitvoering

- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach 'Meten en analyseren' op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de 'Meetinstelling' van Coach dusdanig in dat er gedurende 5 seconden geluid kan worden gemeten. Stel de meetfrequentie in op een voldoende hoge waarde.
- Blaas de grondtoon aan op de didgeridoo en neem het geluid op in Coach6. Een goede toon is te verkrijgen door in de buis te blazen en de lippen zo ontspannen mogelijk te laten trillen ('briesen als een paard'). Dit vergt enige oefening.
- Bepaal door middel van Fourier-analyse de grondfrequentie van de toon die wordt voortgebracht door het instrument. Maak ook een analyse van de diverse boventonen.
- Zaag een stukje van de buis af en herhaal de meetprocedure. Zorg voor minimaal vijf metingen.

5. Verwerking

- Bepaal de golflengte van de staande golf in de buis bij de alle metingen.
- Zet de frequentie f in een grafiek uit tegen de golflengte λ en bepaal uit deze grafiek de voortplantingssnelheid van de golf in de buis (de geluidssnelheid).

3.17. Toonladder

1. Voorbereiding

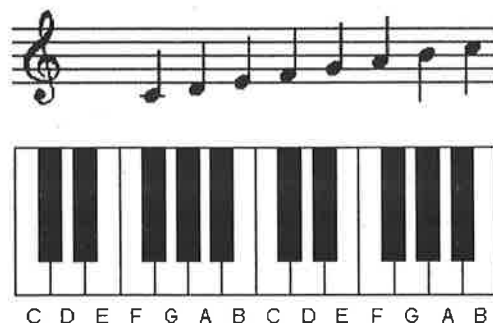
Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 1.1. Trillingen
- 2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

Westerse muziekstijlen zijn opgebouwd uit zogenaamde *toonladders*. Toonladders bestaan uit een in hoogte oplopende of aflopende reeks noten. De laagste (1^e) en hoogste (8^e) toon uit de reeks verschillen in hoogte een waarde die men één octaaf noemt. De frequenties van de verschillende tonen in een toonladder verhouden zich op een bepaalde manier. Deze verhouding heeft een 'sfeer' in een bepaalde melodie tot gevolg. Sommige toonladders klinken treuriger dan anderen. Dit zijn de zogenaamde mineur-toonladders. Arabische en/of Aziatische toonladders zijn op een weer andere manier opgebouwd en klinken daarom totaal anders dan de westerse toonladders.

In figuur 3.12 staat in notenschrift de toonladder in 'C' weergegeven. Op het klavier dat er onder staat, is weergegeven waar de betreffende tonen te vinden zijn op het klavier.



Figuur 3.12: Toonladder in C.

3. Benodigdheden

- keyboard, gitaar of ander instrument
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor

4. Uitvoering

- Bekijk een toonladder, bijvoorbeeld de in figuur 3.12 weergegeven toonladder van 'C', maar het is ook toegestaan een andere toonladder te analyseren.
- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach 'Meten en analyseren' op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de 'Meetinstelling' van Coach dusdanig in dat er gedurende 3 seconden geluid kan worden gemeten. Stel de meetfrequentie in op een voldoende hoge waarde.
- Neem het geluid van de eerste (laagste) toon van de toonladder op in Coach6. Speel de toon op een keyboard, een gitaar of een ander instrument.
- Bepaal door middel van Fourier-analyse de grondfrequentie van de toon die wordt voortgebracht door het instrument.
- Herhaal deze meetprocedure voor de andere tonen van de toonladder.

5. Verwerking

- Analyseer de diverse frequentiespectra en noteer van elke toon de grondfrequentie. Maak hiervan een overzichtelijke tabel.
- Bereken de relatieve waarden van de gemeten frequenties. Stel hiertoe de laagste toon in de toonladder op een relatieve frequentie van 1,00. Deel de frequenties van alle andere tonen door de frequentie van de laagste toon (starttoon). Voeg deze relatieve frequentie toe aan de tabel.
- Analyseer de reeks van relatieve frequenties en trek hieruit (een) conclusie(s).

3.18. Stemming

1. Voorbereiding

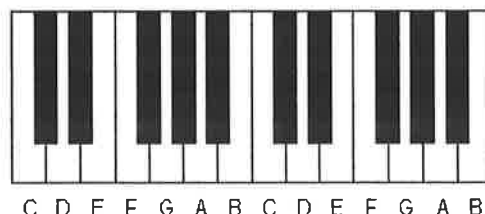
Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 1.1. Trillingen
- 2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

In westerse muziek zijn bepaalde afspraken gemaakt over welke tonen er in een muziekstuk zoal gebruikt kunnen worden. Hierbij kijkt men dan naar de afstanden (verschillen in frequentie) die optreden bij deze tonen. Westerse muziekstijlen zijn opgebouwd uit zogenaamde *toonladders*. Toonladders bestaan uit een in hoogte oplopende of aflopende reeks noten. De frequenties van de verschillende tonen in een toonladder verhouden zich op een bepaalde manier. Arabische en/of Aziatische toonladders zijn op een andere manier opgebouwd en klinken daarom totaal anders dan de westerse toonladders.

Akkoorden zijn combinaties van tonen uit een bepaalde toonladder. Twee (of meer) tegelijkertijd gespeelde tonen dienen echter wel stemmend te zijn. De afstand tussen de tonen moet daarvoor een bepaalde waarde hebben. De toetsen op een piano (witte toets naar zwarte toets, zie figuur 3.13) liggen elk een halve toon uit elkaar. Twee tonen die tegelijkertijd gespeeld worden zijn stemmend als ze minimaal $1\frac{1}{2}$ toon uit elkaar liggen.



Figuur 3.13: Het klavier van een piano.

3. Benodigheden

- keyboard of gitaar
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor

4. Uitvoering

- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach 'Meten en analyseren' op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de 'Meetinstelling' van Coach dusdanig in dat er gedurende 3 seconden geluid kan worden gemeten. Stel de meetfrequentie in op een voldoende hoge waarde.
- Neem het geluid van een willekeurige toon op in Coach6.
- Bepaal door middel van Fourier-analyse de grondfrequentie van de toon die wordt voortgebracht door het instrument.
- Herhaal deze meetprocedure voor een aantal andere tonen van de toonladder. Meet in elk geval de frequenties van tonen die $\frac{1}{2}$, 1, $1\frac{1}{2}$ en 2 toonsafstanden verschillen van de oorspronkelijke toon.

5. Verwerking

- Analyseer de diverse frequentiespectra en noteer van elke toon de grondfrequentie.
- Bereken de relatieve waarden van de gemeten frequenties. Stel hiertoe de oorspronkelijke toon op een relatieve frequentie van 1,00. Deel de frequenties van de andere tonen door de frequentie van de laagste toon (starttoon). Voeg deze relatieve frequentie toe aan de tabel.
- Analyseer de reeks van relatieve frequenties en trek hieruit (een) conclusie(s).

3.19. Gitaar: fretboard

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

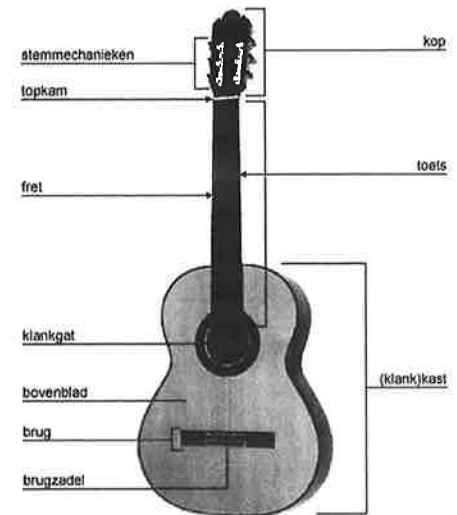
- 1.7. Staande golven in snaren
- 2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

De gitaar is een van de meest gebruikte snaar-instrumenten. Zie figuur 3.14. De belangrijkste onderdelen van een akoestische gitaar zijn de brug en het stemmechaniek om de snaren vast te kunnen klemmen, de klankkast om het geluid te kunnen versterken en het fretboard om de juiste toon te kunnen spelen.

Op het fretboard zijn frets bevestigd (metalen staafjes), waar de snaar tegenaan gedrukt kan worden. De lengte van de snaar kan op deze manier gevarieerd worden. De ruimte tussen twee frets wordt een toets genoemd. Aangezien de geproduceerde toonhoogte direct gekoppeld is aan de lengte van de snaar, zal bij een inkorting van de snaar de toon hoger klinken.

De frets zijn dusdanig op het fretboard bevestigd dat bij inkorting van de snaar met één fretafstand de klank een halve toon verhoogd wordt.



Figuur 3.14: De onderdelen van een gitaar.

3. Benodigheden

- akoestische gitaar of elektrische gitaar (met versterker)
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor

4. Uitvoering

- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach 'Meten en analyseren' op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de 'Meetinstelling' van Coach dusdanig in dat er gedurende 5 seconden geluid kan worden gemeten. Stel de meetfrequentie in op een voldoende hoge waarde.
- Plaats je vinger in de eerste toets (voor de eerste fret) van de eerste (laagste) snaar en sla de snaar aan met je vingers of een plectrum. Je hoort nu de toon F. Neem het geluid van deze toon op in Coach. Meet ook de lengte van de snaar in deze stand.
- Bepaal door middel van Fourier-analyse de grondfrequentie van de toon die wordt voortgebracht door de gitaar.
- Herhaal deze meetprocedure voor het tweede vakje (toon Fis), derde vakje (toon G), enz. Ga door t/m het achtste vakje. De serie tonen is dan: F / Fis / G / As / A / Bes / B / C

5. Verwerking

- Verwerk de meetresultaten in een tabel. Plaats in deze tabel ook de verhoudingen van de snaarlengte en frequentie t.o.v. elkaar. Stel de lengte van de snaar en de frequentie van de snaar hiertoe op 1,00 bij de eerste meting (eerste toets).
- Teken een grafiek waarin je de frequentie (in Hz) uitzet tegen de snaarlengte (in m).

3.20. Gitaar: stringbend

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 1.7. Staande golven in snaren
- 2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

Gitaristen gebruiken allerlei trucs om een betere beheersing van hun instrument te realiseren. Zo is er allerlei effectapparatuur op de markt waarmee de meest fantastische klanken geproduceerd kunnen worden.

Met behulp van alleen een gitaar (dus zonder toegevoegde elektronica) kan een gitarist(e) echter ook al een aardig eind komen. Door gebruik te maken van een bepaalde vingerzetting kan de gitarist(e) er voor zorgen dat er met zijn/haar gitaar een bepaalde klank en/of klankeffect te horen is. Eén van deze trucs is de zogenaamde 'stringbend', zie figuur 3.15. Bij deze vingerzetting duwt de gitarist(e) zijn/haar snaar een stukje naar boven of trekt de gitarist(e) de snaar een stukje naar beneden.



Figuur 3.15: Een stringbend.

Door het uitoefenen van de extra kracht zal de spankracht in de snaar toenemen. Een toename van deze spankracht heeft tot gevolg dat ook de golfsnelheid in de snaar toe zal nemen. Aangezien de golflengte nagenoeg ongewijzigd blijft, zal de frequentie van de toon toenemen. Denk hierbij aan de formule:

$$v = \lambda \cdot f$$

3. Benodigheden

- gitaar (akoestisch of elektrisch)
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor

4. Uitvoering

- Kies een bepaalde toon (snaar en toets) op de gitaar. Zoek hiertoe uit welke snaar zich redelijk makkelijk laat buigen en bij welke snaarlengte dit makkelijk gaat. Zoek dus een punt op de gitaar waarbij de stringbend een duidelijk hogere toon geeft.
- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach 'Meten en analyseren' op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de 'Meetinstelling' van Coach dusdanig in dat er gedurende 5 seconden geluid kan worden gemeten. Stel de meetfrequentie in op een voldoende hoge waarde.
- Neem het geluid van de toon op de gitaar op in Coach.
- Bepaal door middel van Fourier-analyse de grondfrequentie van de toon die wordt voortgebracht door het instrument. Maak ook een analyse van de diverse boventonen.
- Herhaal deze meetprocedure voor dezelfde toon, maar druk de snaar nu zo hard als mogelijk op, zodat er een hogere toon ontstaat.

5. Verwerking

- Bepaal de grondfrequentie van de oorspronkelijke toon en de verhoogde toon. Analyseer ook eventuele boventonen.
- Bepaal met welke factor de golfsnelheid in de snaar is toegenomen door gebruik te maken van de stringbend.
- Zoek uit met welke factor de spankracht in de snaar vergroot is door de stringbend.

3.21. Interferentie (1)

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 1.6. Interferentie
- 2.1. Geluidsintensiteit en geluidsniveau

2. Inleiding

Als er zich in een ruimte meerdere geluidsbronnen bevinden, zullen de geluidsgolven die worden uitgezonden door de afzonderlijke geluidsbronnen elkaar beïnvloeden. De geluidsbronnen interfereren met elkaar.

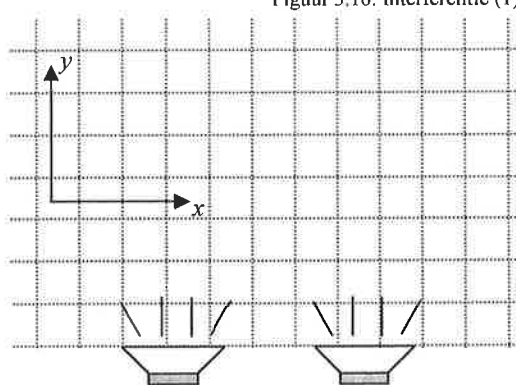
In de praktijk (bijvoorbeeld in een concertzaal, een bioscoop of thuis) is dit verschijnsel ongewenst, maar ook moeilijk waar te nemen. Normaliter bestaan geluiden uit diverse frequenties en deze worden dus gedragen door golven met zeer diverse golflengten. Als er in een ruimte echter twee (of meer) geluidsbronnen worden geplaatst die exact dezelfde toon uitzenden, treedt er wel interferentie op. Op bepaalde plekken in de ruimte ontstaan punten (of lijnen) waar een lager geluidsniveau heerst, terwijl op andere punten (of lijnen) juist een toename van het geluidsniveau te meten is.

3. Benodigdheden

- toongenerator
- 2 identieke luidsprekers
- digitale decibelmeter

4. Uitvoering

- Plaats in een ruimte twee luidsprekers ongeveer 2,5 m uit elkaar, zoals weergegeven in figuur 3.16.
- Verbind de luidsprekers met de toongenerator. Zorg ervoor dat de luidsprekers een zuivere toon produceren, wat betekent dat de toongenerator een harmonische trilling moet aanbieden aan de luidsprekers.
- Klem de decibelmeter in een statief op een bepaalde hoogte (bijvoorbeeld 1,0 m).
- Verdeel de ruimte op de hoogte van de decibelmeter in een (denkbeeldig) raster. Zorg ervoor dat de rasterpunten ongeveer op een afstand van 30 cm uit elkaar liggen.
- Stel een frequentie in op de toongenerator van 400 Hz en schakel hem in.
- Meet op alle rasterpunten de waarde van het geluidsniveau.



Figuur 3.16: Interferentie (1).

5. Verwerking

- Maak een nauwkeurige tekening van de (cirkelvormige) golven en bepaal hieruit de globale ligging van de maxima en de minima.
- Verwerk de meetresultaten op een overzichtelijke wijze in een tabel.
- Teken een drie-dimensionale grafiek waarin het geluidsniveau L (in dB) tegen de plaatscoördinaten x en y (in m) staan uitgezet. Drie-dimensionale grafieken zijn o.a. te maken met het spreadsheetprogramma Excel. Klik na invoer van de meetresultaten op het werkblad op 'Invoegen' en 'Grafiek'. Kies vervolgens voor 'Oppervlak'.
- Lees in de grafiek de maxima en minima in de ruimte af.
- Vergelijk de resultaten van deze proef met de resultaten van de proeven 3.22 en 3.23.

3.22. Interferentie (2)

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

1.6. Interferentie

2.1. Geluidsintensiteit en geluidsniveau

2. Inleiding

Als er zich in een ruimte meerdere geluidsbronnen bevinden, zullen de geluidsgolven die worden uitgezonden door de afzonderlijke geluidsbronnen elkaar beïnvloeden. De geluidsbronnen interfereren met elkaar.

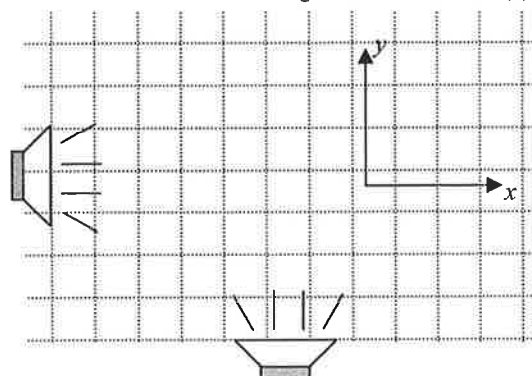
In de praktijk (bijvoorbeeld in een concertzaal, een bioscoop of thuis) is dit verschijnsel ongewenst, maar ook moeilijk waar te nemen. Normaliter bestaan geluiden uit diverse frequenties en deze worden dus gedragen door golven met zeer diverse golflengten. Als er in een ruimte echter twee (of meer) geluidsbronnen worden geplaatst die exact dezelfde toon uitzenden, treedt er wel interferentie op. Op bepaalde plekken in de ruimte ontstaan punten (of lijnen) waar een lager geluidsniveau heerst, terwijl op andere punten (of lijnen) juist een toename van het geluidsniveau te meten is.

3. Benodigheden

- toongenerator
- 2 identieke luidsprekers
- digitale decibelmeter

4. Uitvoering

- Plaats in een ruimte twee luidsprekers ten opzichte van elkaar zoals weergegeven in figuur 3.17.
- Verbind de luidsprekers met de toongenerator. Zorg ervoor dat de luidsprekers een zuivere toon produceren, wat betekent dat de toongenerator een harmonische trilling moet aanbieden aan de luidsprekers.
- Klem de decibelmeter in een statief op een bepaalde hoogte (bijvoorbeeld 1,0 m).
- Verdeel de ruimte op de hoogte van de decibelmeter in een (denkbeeldig) raster. Zorg ervoor dat de rasterpunten ongeveer op een afstand van 30 cm uit elkaar liggen.
- Stel een frequentie in op de toongenerator van 400 Hz en schakel hem in.
- Meet op alle rasterpunten de waarde van het geluidsniveau.



Figuur 3.17: Interferentie (2).

5. Verwerking

- Maak een nauwkeurige tekening van de (cirkelvormige) golven en bepaal hieruit de globale ligging van de maxima en de minima.
- Verwerk de meetresultaten op een overzichtelijke wijze in een tabel.
- Teken een drie-dimensionale grafiek waarin het geluidsniveau L (in dB) tegen de plaatscoördinaten x en y (in m) staan uitgezet. Drie-dimensionale grafieken zijn o.a. te maken met het spreadsheetprogramma Excel. Klik na invoer van de meetresultaten op het werkblad op 'Invoegen' en 'Grafiek'. Kies vervolgens voor 'Oppervlak'.
- Lees in de grafiek de maxima en minima in de ruimte af.
- Vergelijk de resultaten van deze proef met de resultaten van de proeven 3.21 en 3.23.

3.23. Interferentie (3)

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 1.6. Interferentie
- 2.1. Geluidsintensiteit en geluidsniveau

2. Inleiding

Als er zich in een ruimte meerdere geluidsbronnen bevinden, zullen de geluidsgolven die worden uitgezonden door de afzonderlijke geluidsbronnen elkaar beïnvloeden. De geluidsbronnen interfereren met elkaar.

In de praktijk (bijvoorbeeld in een concertzaal, een bioscoop of thuis) is dit verschijnsel ongewenst, maar ook moeilijk waar te nemen. Normaliter bestaan geluiden uit diverse frequenties en deze worden dus gedragen door golven met zeer diverse golflengten. Als er in een ruimte echter twee (of meer) geluidsbronnen worden geplaatst die exact dezelfde toon uitzenden, treedt er wel interferentie op. Op bepaalde plekken in de ruimte ontstaan punten (of lijnen) waar een lager geluidsniveau heerst, terwijl op andere punten (of lijnen) juist een toename van het geluidsniveau te meten is.

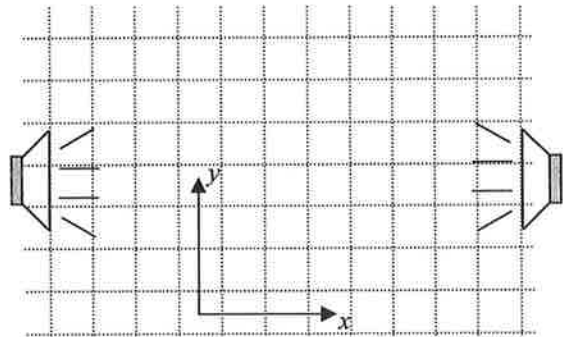
3. Benodigdheden

- toongenerator
- 2 identieke luidsprekers
- digitale decibelmeter

4. Uitvoering

- Plaats in een ruimte twee luidsprekers ten opzichte van elkaar zoals weergegeven in figuur 3.18.
- Verbind de luidsprekers met de toongenerator. Zorg ervoor dat de luidsprekers een zuivere toon produceren, wat betekent dat de toongenerator een harmonische trilling moet aanbieden aan de luidsprekers.
- Klem de decibelmeter in een statief op een bepaalde hoogte (bijvoorbeeld 1,0 m).
- Verdeel de ruimte op de hoogte van de decibelmeter in een (denkbeeldig) raster. Zorg ervoor dat de rasterpunten ongeveer op een afstand van 30 cm uit elkaar liggen.
- Stel een frequentie in op de toongenerator van 400 Hz en schakel hem in.
- Meet op alle rasterpunten de waarde van het geluidsniveau.

Figuur 3.18: Interferentie (3).



5. Verwerking

- Maak een nauwkeurige tekening van de (cirkelvormige) golven en bepaal hieruit de globale ligging van de maxima en de minima.
- Verwerk de meetresultaten op een overzichtelijke wijze in een tabel.
- Teken een drie-dimensionale grafiek waarin het geluidsniveau L (in dB) tegen de plaatscoördinaten x en y (in m) staan uitgezet. Drie-dimensionale grafieken zijn o.a. te maken met het spreadsheetprogramma Excel. Klik na invoer van de meetresultaten op het werkblad op 'Invoegen' en 'Grafiek'. Kies vervolgens voor 'Oppervlak'.
- Lees in de grafiek de maxima en minima in de ruimte af.
- Vergelijk de resultaten van deze proef met de resultaten van de proeven 3.21 en 3.22.

3.24. Muziekslang

1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

1.8. Staande golven in luchtkolommen

2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

Onder bepaalde voorwaarden kan in een luchtkolom een staande golfbeweging optreden. De lengte van de kolom, de golfsnelheid (geluidssnelheid) en de frequentie van de geluidsbron staan dan op een dusdanige manier met elkaar in verhouding dat er in de luchtkolom een staande golf met een veelvoud van een halve golflengte ($n \cdot \frac{1}{2} \cdot \lambda$) ontstaat,

mits de luchtkolom begrensd is door twee open (of gesloten) uiteinden.

Fysisch komt dit verschijnsel er op neer dat een geluidsbron een golf produceert in de luchtkolom. Als deze golf bij het uiteinde van de kolom aankomt reflecteert deze. Heengaande golf (vanaf de geluidsbron) en gereflecteerde golf interfereren vervolgens dusdanig dat er een staande golf ontstaat.

Door een slang rond te draaien kan deze toestand van interferentie ontstaan. De lucht rondom de slang 'waait' als het ware over de monding van de slang, waardoor een toon te horen is (vergelijkbaar met het aanblazen van een dwarsfluit). Zie figuur 3.19.



Figuur 3.19: Een ronddraaiende muziekslang.

3. Benodigheden

- muziekslang
- stopwatch
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor

4. Uitvoering

- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach 'Meten en analyseren' op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de 'Meetinstelling' van Coach dusdanig in dat er gedurende 5 seconden geluid kan worden gemeten. Stel de meetfrequentie in op een voldoende hoge waarde.
- Draai de muziekslang rond en neem het geluid op in Coach. Het geluidsniveau dat de muziekslang voortbrengt zal redelijk beperkt zijn. Houd hier rekening mee bij je proefopstelling.
- Meet de lengte van de muziekslang en de omlooptijd bij draaiing. Bepaal met welke frequentie de muziekslang draait (aantal omwentelingen per seconde).
- Bepaal door middel van Fourier-analyse de frequentie van de toon die wordt voortgebracht door de muziekslang.
- Herhaal deze meetprocedure voor hogere snelheden van de muziekslang (er zullen ongeveer vier meetpunten te verzamelen zijn).

5. Verwerking

- Verwerk de meetresultaten in een tabel en teken een grafiek waarin de frequentie van de voortgebrachte toon (in Hz) staat uitgezet tegen de omloofrequentie (in Hz).
- Trek conclusies uit de verkregen grafiek. Voer zo mogelijk een functiefit uit.

3.25. Dopplereffect

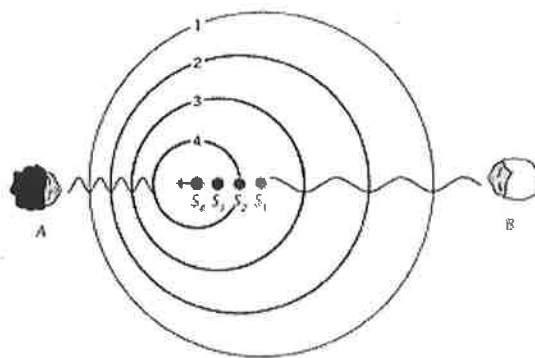
1. Voorbereiding

Neem voor het uitvoeren van dit experiment de volgende theorie door:

- 2.2. Dopplereffect
- 2.3. Fourier-analyse

2. Inleiding

Het *dopplereffect* is een geluidseffect dat in het dagelijks regelmatig waar te nemen is. De sirene van een ambulance die een waarnemer passeert, wordt wat betreft toonhoogte (frequentie) niet als constant waargenomen. Wanneer de ambulance naar de waarnemer toe rijdt, neemt deze de frequentie hoger waar dan wanneer de ambulance van hem/haar af rijdt. De verklaring hiervoor is weergegeven in figuur 3.20. De geluidsbron S beweegt in deze figuur van rechts naar links. De geluidsbron beweegt dus als het ware achter zijn uitgezonden geluidsgolven aan. De geluidsgolf die waarnemer A bereikt wordt samengedrukt en dus neemt deze waarnemer een hogere frequentie waar. De geluidsgolf die waarnemer B bereikt wordt juist uitgetrokken, waardoor B een hogere frequentie waarneemt. Hierbij geldt immers: $v = \lambda \cdot f$.



Figuur 3.20: Het dopplereffect.

Het dopplereffect kan weergegeven worden met behulp van de formule:

$$f_w = \left(\frac{v}{v - v_b} \right) \cdot f_b$$

In deze formule geldt dat f_w de waargenomen frequentie is (in Hz), f_b de bronfrequentie (de frequentie van de geluidsbron als deze stilstaat) (in Hz), v de geluidssnelheid (in m/s) en v_b de snelheid van de geluidsbron (in m/s).

3. Benodigheden

- opname van het dopplereffect
- computer (met Coach6) en coachlab
- geluidsensor

4. Uitvoering

- Sluit de geluidsensor aan op de coachlab en sluit de coachlab aan op de computer.
- Start Coach ‘Meten en analyseren’ op en selecteer de juiste sensor.
- Stel de ‘Meetinstelling’ van Coach dusdanig in dat er gedurende 10 seconden geluid kan worden gemeten. Stel de meetfrequentie in op een voldoende hoge waarde.
- Neem in Coach het geluid op van de naderende geluidsbron en bepaal door middel van Fourier-analyse de grondfrequentie van de toon die wordt voortgebracht.
- Neem in Coach het geluid op van de zich verwijderende geluidsbron en bepaal door middel van Fourier-analyse de grondfrequentie van de toon die wordt voortgebracht.

5. Verwerking

- Bereken snelheid van de geluidsbron v_b en de frequentie van de geluidsbron f_b .