

Leerdoelen

Wat je moet kennen en kunnen aan het eind van blok 13

1 Je moet een aantal geluidsbronnen kunnen noemen. [P1, T1, W1]

2 Je moet minstens twee proeven kunnen beschrijven waaruit blijkt dat er voor ontvangst een medium (tussenstof) nodig is tussen de geluidsbron en de geluidsontvanger. [P1, T1]

3 Je moet in een bepaalde situatie kunnen aangeven wat het medium is. [P1, T1, W1]

4 Je moet twee soorten geluidsontvangers kunnen noemen. [P1, T1]

5 Je moet weten dat de decibel de eenheid van geluidsterkte is (afgekort dB) en je moet met een decibelmeter de geluidsterkte kunnen meten. [P1, T1, W1]

6 Je moet weten dat de geluidsterkte afneemt wanneer de afstand tussen de geluidsbron en de ontvanger wordt vergroot. [P1, T1, W1]

7 Je moet verschijnselen of proeven kunnen beschrijven waaruit blijkt dat geluid uit een trilling ontstaat. [P1, T1, W1]

8 Je moet de geluidssnelheid v kunnen berekenen als afstand en tijd gegeven zijn. [T1, W1]

9 Je moet twee soorten maatregelen kunnen noemen om geluidshinder tegen te gaan. [P1, T1, W1]

10 Je moet weten dat geluid door voorwerpen kan worden teruggekaatst. [T1, W1]

11 Je moet de volgende trillingsgrootheden met symbolen en eenheden kennen:

- amplitude (A ; m);
- trillingstijd (T ; s);
- frequentie (f ; Hz). [P2, T2, W2]

12 Je moet de frequentie kunnen berekenen uit de trillingstijd. [P2, T2, W2]

13 Je moet de trillingstijd en de amplitude kunnen bepalen uit een uitwijking, tijd-diagram (u, t -diagram) van een trilling. [P2, T2, W2]

14 Je moet uit oscilloscoopbeelden van geluidstrillingen conclusies kunnen trekken over de geluidsterkte. [P2, T2, W2]

15 Je moet weten dat de toonhoogte wordt bepaald door de frequentie. [P2, T2, W2]

16 Je moet kunnen aangeven wanneer er sprake is van resonantie. [P3, T3, W3]

17 Je moet kunnen aangeven wat de functie is van de klankkast van een muziekinstrument. [P3, T3, W3]

18 Je moet het verband kunnen aangeven tussen de grootte van de klankkast en de toon die het muziekinstrument voortbrengt. [P3, T3, W3]

19 Je moet het menselijk oor schematisch kunnen tekenen en de werking ervan kunnen uitleggen. [T3, W3]

20 Je moet het frequentiebereik van het menselijk oor kunnen aangeven. [T3, W3]

21 Je moet kunnen uitleggen waarom dezelfde toon verschillend klinkt als deze wordt gespeeld op verschillende instrumenten. [P3, T3, W3]

22 Je moet weten wat een frequentiekenarakteristiek is. [P3, T3, W3]

23 Je moet uit een frequentiekenarakteristiek het frequentiebereik van een box of van een losse luidspreker kunnen bepalen. [T3, W3]

24 Je moet weten dat de toon wordt verhoogd als je de snaarspanning groter maakt. [P3, T3, W3]

25 Je moet weten dat je met een kortere snaar een hogere toon krijgt. [P3, T3, W3]

26 Je moet weten dat dikkere snaren een lagere toon geven dan dunnere. [P3, T3, W3]

Blok 13

Geluid

Basisstof

T1 Geluid, wat is dat? 120

W1 123

T2 Trillingen 124

W2 127

T3 Geluid en muziek 128

W3 132

Herhaalstof

H1 Geluid 133

H2 Geluid en trillingen 135

H3 Geluid en muziek 138

Extrastof

E1 Wat zijn geluidstrillingen? 140

E2 De luidspreker 143

E3 Sirenes en sonar 145



Stilte, echte stilte, komt weinig voor. Meestal zijn er wel dingen om ons heen die geluid produceren. Vaak vinden we het fijn om geluiden te horen. De radio, televisie, onze stem en muziekinstrumenten produceren geluiden die we niet willen missen. Maar geluiden kunnen soms zo hard zijn dat we er last van hebben. Denk maar aan een laag overvliegend vliegtuig, verkeersoverlast, lawaai in de klas als jij nog net even iets voor het proefwerk wilt nakijken. Zelfs een te hard spelende popgroep kan zoveel geluid produceren dat je

je oren wilt dichtstoppen.

Wat is geluid? Geluid is niets anders dan trillende lucht. Die trillende lucht brengt het trommelvlies in je oor in beweging en dat ervaar jij als geluid. Hoe wordt lucht in trilling gebracht? Dat kun je op verschillende manieren doen, bijvoorbeeld met je stem, met muziekinstrumenten en met allerlei apparaten die met elektrische signalen werken.

Geluidsbronnen

In een luidspreker brengt een elektrisch signaal de conus in trilling (figuur 1). De conus brengt de lucht in trilling: de luidspreker produceert geluid. Alle voorwerpen die de lucht in trilling brengen en die daardoor geluid produceren, worden geluidsbronnen genoemd.

Een *toongenerator* is een apparaat dat verschillende soorten elektrische signalen kan produceren. Stellen we de toongenerator in op een zeer lage toon, dan zien we de conus wel heen en weer bewegen maar horen we geen geluid. De heen en weer gaande beweging van de conus laat ook de lucht voor en achter de luidspreker trillen. Als we op korte afstand van de luidspreker een brandende kaars plaatsen, zien we aan het bewegen van het vlammetje dat de lucht door de luidspreker in trilling wordt gebracht. Verhogen we de toon totdat we het geluid horen, dan wordt de lucht zodanig in trilling gebracht, dat ons oor die trilling kan waarnemen. Bij hoge tonen trilt de conus zo snel heen en weer dat we de trillingen niet meer kunnen zien.

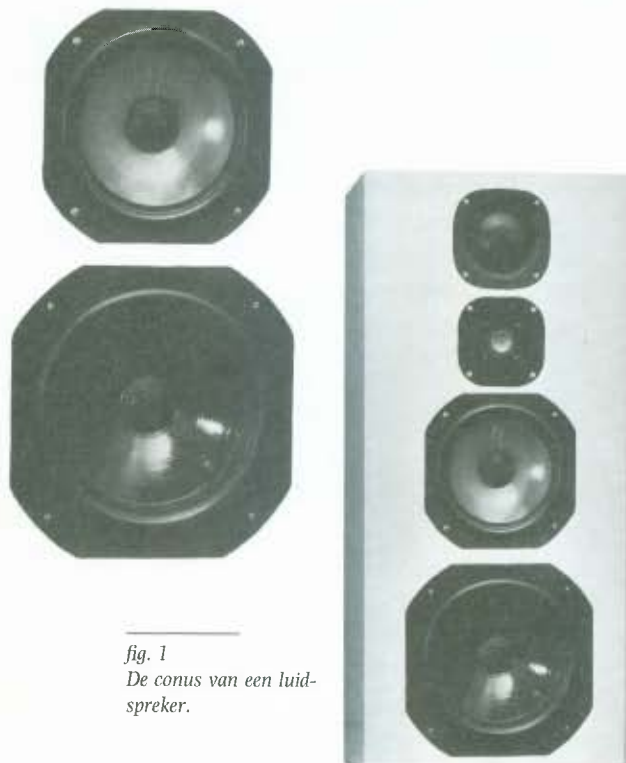


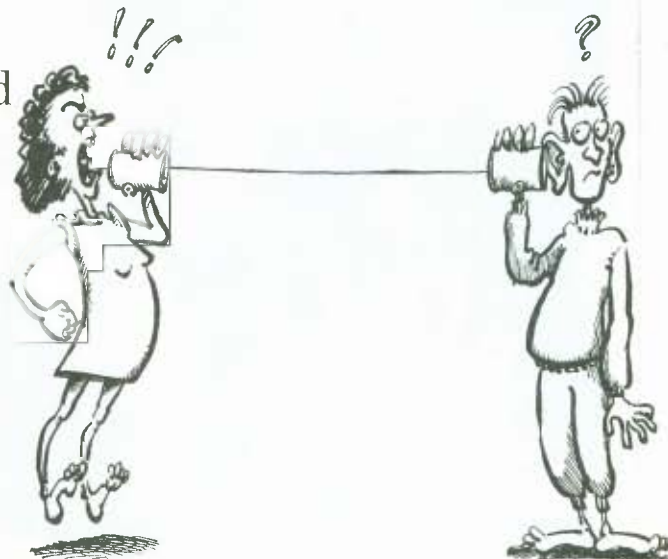
fig. 1
De conus van een luidspreker.

Samenvattend weten we tot nu toe:
geluidsbron = trillend voorwerp → trillende lucht →
trillend trommelvlies → we ervaren geluid.

De voortplanting van geluid

We plaatsen een rinkelende bel onder een stolp. We zuigen de lucht onder de stolp weg met een vacuumpomp. Na enige tijd is de bel nauwelijks meer te horen. De lucht is blijkbaar nodig om de geluiden over te brengen.

Twee blikjes met een strak gespannen touw ertussen kunnen als een soort telefoon werken. De geluidstrillingen planten zich voort door het touw. Deze proef met



de blikjes en het touw toont aan dat geluidstrillingen zich ook door andere stoffen dan door lucht kunnen voortplanten. Denk hierbij ook aan het zich voortplanten van geluid door verwarmingsbuizen. We zeggen dan: er is een medium nodig tussen geluidsbron en ontvanger.

De snelheid waarmee geluidstrillingen zich voortplanten is vrij groot. Maar toch kunnen we zelf merken dat geluid enige tijd nodig heeft om zich te verplaatsen.

Als we op enkele honderden meters afstand naar een vallend heiblok kijken, zien we eerst het heiblok op de paal terechtkomen en even later horen we pas de daarbij horende klap. Geluidstrillingen bewegen zich door de lucht met een snelheid van 340 meter per seconde.

$$v_{\text{geluid}} = 340 \text{ m/s.}$$

De toevoeging 'door lucht' is nodig, omdat in elke stof de geluidssnelheid anders is. In de tabel van figuur 2 is de geluidssnelheid gegeven in een aantal stoffen. De afstand die door het geluid wordt afgelegd is te berekenen met:

$$s = v_{\text{geluid}} \cdot t$$

Als je dus na 2 seconden de klap van het heiblok hoort sta je op een afstand van:

$$340 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 2 \text{ s} = 680 \text{ m}$$

Geluidssterkte

Geluiden kunnen verschillen in sterkte. De ene geluidsbron maakt meer geluid dan de andere. Met je oren kun je dat waarnemen. De decibelmeter (dB-meter) is een instrument om geluidssterkte te kunnen meten. De eenheid van geluidssterkte is de decibel (dB). Bij metingen met de dB-meter merk je dat de geluidssterkte afhangt van de afstand tot de bron. De geluidssterkte neemt af naarmate de afstand tot de geluidsbron groter wordt.

In de tabel van figuur 3 zijn we er daarom van uitgegaan dat je op normale afstand van de geluidsbron staat. Als je bijvoorbeeld het geluid in een straat wilt meten, meet je de geluidssterkte vanaf de stoep.

fig. 2
Geluidssnelheid in verschillende stoffen.

stof	geluidssnelheid	
	in m/s	in km/h
ijzer	5100	18400
koper	3700	13300
glycerol	1920	6920
water	1480	5330
lucht	340	1220

(De geluidssnelheid is nl. verwaarloosbaar klein t.o.v. de lichtsnelheid, welke 300 000 km/s is!)

Geluidstrillingen kunnen door voorwerpen worden teruggekaatst. Wanneer de afstand waarover het geluid terugkaatst groot genoeg is, horen we het teruggekaatste geluid later dan het oorspronkelijke geluid. Dit verschijnsel noemen we de echo. Met behulp van de echo kan de afstand tot een voorwerp worden bepaald. De geluidsbron en de ontvanger bevinden zich dan op dezelfde plaats. De afgelegde weg van het geluid (de echo) is daardoor tweemaal zo groot als de afstand tot het voorwerp. Het geluid legt immers eerst de weg af naar een voorwerp en kaatst dan terug naar de plaats waar het vandaan is gekomen.

fig. 3
Geluidssterkte in verschillende situaties.

geluid	sterkte (dB)
vallend blaadje	10
iemand die zacht fluistert	20
een stel fluisterende kinderen	30
autoverkeer in een rustige straat	40-50
iemand die staat te telefoneren	60
een televisie die hard aan staat	70
een bromfiets vlakbij	80
een trein vlakbij	90-100
maximale sterkte in een discotheek	110
een auto die dichtbij toetert	120
een startend straalvliegtuig	130
pijngrens	140

Geluidshinder

Geluid kan soms erg hinderlijk zijn. Denk maar aan laag overvliegende vliegtuigen, verkeerslawaaï, enz. Maar niet alleen mensen die in de buurt van een vliegveld wonen of langs een drukke weg, hebben last van geluidshinder. Ook in de industrie, door allerlei werk thuis en door radio en t.v. kan hinderlijk lawaai ontstaan waar jij of je burens last van hebben. Geluiden waar de een van geniet, kunnen voor de ander hinderlijk zijn. Denk maar aan harde muziek uit een disco, die door de omliggende wijk vaak minder wordt gewaardeerd. Er zijn allerlei wetten en regels opgesteld om geluidshinder te beperken.

Al deze wetten en regels zijn nodig omdat geluidshinder vervelend is en slecht kan zijn voor de gezondheid. Onderzoekingen hebben aangetoond dat gehoorbeschadigingen kunnen optreden als het oor regelmatig te zwaar wordt belast. Bijvoorbeeld als je veel luistert naar keiharde muziek, vooral via een koptelefoon. Je kunt dan op den duur vooral de hogere tonen niet meer horen. Mensen die veel met lawaaiërende apparaten

werken, moeten daarom oorbeschermers dragen. Het zou nog beter zijn om het lawaai van die machines binnen de perken te houden. De overheid geeft daar voorschriften voor.

In de 'wet geluidshinder voor industriële en horecabedrijven' staan geluidssterkten vermeld die niet mogen worden overschreden. Behalve in deze wet staan er nog veel regels in de hinderwet voor bedrijven, in algemene politieverordeningen, in de wegenverkeerswet, enz. Internationaal zijn er normen vastgesteld over de toelaatbare geluidssterkte. In een normale woonwijk is dit bijvoorbeeld overdag 50 dB, 's avonds 45 dB en 's nachts 35 dB. In het centrum van een stad mag de geluidssterkte wat hoger liggen: overdag maximaal 60 dB, 's avonds 55 dB en 's nachts 45 dB.

Geluidsdemping

Om geluidshinder te beperken kunnen allerlei geluidsdempende materialen worden gebruikt. Het geluid wordt door deze materialen geabsorbeerd (= opgenomen). De demping van het geluid hangt af van het soort materiaal en van de dikte van de geluidsdempende laag. Goede geluidabsorberende materialen zijn stoffen die veel lucht bevatten, zoals: piepschuim (= polystyreen), watten, glaswol enz. De absorptie van het geluid neemt toe als de laag geluidsdempend materiaal dikker is (enkele vellen papier op elkaar dempen het geluid bijvoorbeeld veel beter dan één vel).

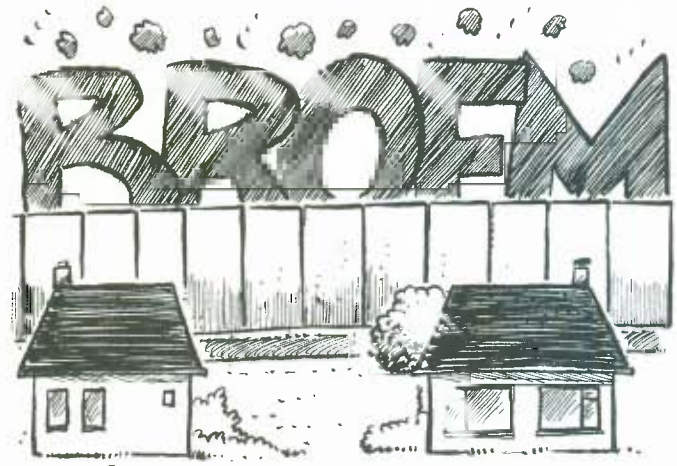
Ook in de bouwwereld is onderzocht welke materialen het geluid goed kunnen dempen. Dat zijn bijvoorbeeld gips, spaanplaat en bepaalde soorten beton. Bij de bouw van machinehallen en fabrieken worden deze materialen gebruikt om geluidsoverlast te voorkomen. Dezelfde geluidabsorberende materialen kunnen ook toegepast worden in de woningbouw. In huizen naast een drukke verkeersweg kunnen gipsplaten of spaanplaten langs de muren worden aangebracht. Deze platen moeten dan wel enkele centimeters dik zijn. Dubbele ramen met daartussen lucht, dempen het geluid van buiten beter dan enkele ramen.

Bij het dempen van geluid blijkt dat hoge tonen sterker worden gedempt dan lage tonen. Wanneer bijvoorbeeld bij de burens de radio hard aanstaat, hoor je vooral de lage tonen. De tussenliggende muur dempt namelijk de hoge tonen veel beter dan de lage tonen.

Het meetrillen van de kastwanden van luidsprekerboxen kan worden tegengegaan door aan de binnenzijde van de kast dempingsmateriaal aan te brengen. Schuimvormige materialen lenen zich daarvoor uitstekend, maar ook watachtige materialen komen in aanmerking. Het aanbrengen van het dempingsmateriaal is erop gericht de kast zoveel mogelijk 'dood' te maken. Toch is, zeker bij een gesloten systeem, de 'kastkleuring' daarmee niet geheel uit te bannen. Geluidsdemping en terugkaatsing spelen vanzelfsprekend ook een belangrijke rol in een concertzaal en opnamestudio. Veel geluidsdempend materiaal maakt een ruimte 'dood', te weinig geluidsdempend materiaal veroorzaakt nagalm.

Langs drukke verkeerswegen wordt soms een geluidswal aangebracht: een lange zandwal of platen van enkele meters hoog. Het geluid van het autoverkeer wordt door de geluidswal gedeeltelijk geabsorbeerd en voor een deel teruggekaatst. Hierdoor heeft de achterliggende woonwijk minder last van het autolawaai.

fig. 4
Geluidswal.



Blok 13

W1

1 Waarom hoor je een bel onder een stomp niet meer als de lucht onder de stomp wordt weggezogen?

2 Waarom is het nodig om buiten een beschermend kapje rond de microfoon van de dB-meter te bevestigen?

3a Kun je 'geluidsgolven' van de maan naar de aarde zenden?

b Licht je antwoord toe.

4a Waarom is de norm voor geluidsterkte in een woonwijk overdag hoger gesteld dan 's nachts?

b Waarom is die norm in een stadscentrum hoger dan in een buitenwijk, de bewoners in het centrum hebben er toch evenveel hinder van?

5 De wettelijke maximale geluidsterkte van een bromfiets is 73 dB.

a Waarom zegt dit op zichzelf niets?

b Bedenk enkele omstandigheden waaronder die 73 dB gemeten moeten worden.

6 Soms kun je tijdens een onweer bepalen hoe ver de bliksem van je verwijderd is. Je krijgt een idee van de afstand door te meten hoeveel tijd er ligt tussen het zien van de bliksemflits en het horen van de donder.

a Hoe ver is de bliksem bij je vandaan als er 10 s zit tussen het zien van de lichtflits en het horen van de donder?

b Moet je bij de berekening ook rekening houden met de lichtsnelheid?

7 Hoe zou je met behulp van echo's de geluidssnelheid kunnen bepalen?

8 Je staat op 255 m afstand van een ontzettend groot gebouw. Je geeft een harde schreeuw. Je hoort de echo na 1,5 s.

Bereken de geluidssnelheid.

9 Bij welke snelheid gaat een vliegtuig door de geluidsbarrière? (in m/s en in km/h)

10 Jan beweert dat lage tonen zich veel langzamer voortplanten dan hoge tonen. Annemiek beweert dat lage en hoge tonen zich even snel naar alle kanten voortplanten.

a Wie heeft er volgens jou gelijk?

b Bedenk een voorbeeld waaruit dat blijkt.

11 Bij een hardlooptwedstrijd op de baan staat de tijdwaarnemer bij de finish. De start is aan de andere kant van de baan. De afstand tussen de tijdwaarnemer en de starter is 170 m. De tijdwaarnemer drukt de stopwatch in wanneer hij het geluid van het startpistool hoort.

a Welke fout maakt de tijdwaarnemer?

b Hoe groot is de fout (in s) die hij bij zijn meting maakt?



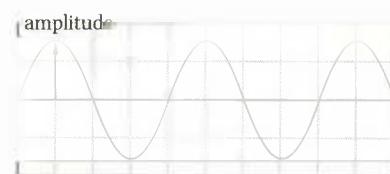
Als je de beweging bestudeert van een stemvork, een trillende veer en een slingerend blokje, ontdek je een aantal overeenkomsten: het is een heen en weer gaande beweging om een bepaalde evenwichtsstand. In de natuurkunde noemen we deze bewegingen trillingen. De trillingen van een slingerend blokje of van een veer kunnen we gemakkelijk bestuderen. Maar heel snelle trillingen, zoals van een stemvork, kunnen we met het blote oog niet zien. Dit geldt natuurlijk ook voor trillen in de lucht (geluidstrillingen).

Deze trillingen kunnen we beter bestuderen door een oscilloscoop te gebruiken. Een oscilloscoop, kortweg scoop, zet elektrische trillingen om in een zichtbaar signaal op een beeldscherm. Als geluidsbron gebruiken we een *toongenerator*. Een toongenerator is een apparaat dat geluid voortbrengt, waarvan we de toonhoogte en de geluidsterkte kunnen veranderen. Op een toon-

generator is een aansluiting aanwezig voor een scoop. Door de toongenerator tegelijk te verbinden met een luidspreker en een oscilloscoop, kunnen we de geluidstrillingen tegelijkertijd horen én zichtbaar maken op het beeldscherm van de scoop. Als de scoop goed is ingesteld, zie je op het scherm een golfbeweging ontstaan. Als het geluid slechts uit één enkelvoudige toon bestaat, is de golf sinusvormig (figuur 5).

fig. 5

Trilling van een enkelvoudige toon.



Amplitude

Door de geluidsterkte te vergroten, zie je de golven op het beeldscherm hoger worden. De maximale uitwijking wordt dan groter. De totale lengte van de golf blijft wel hetzelfde (figuur 6). De maximale uitwijking van de

trilling, OA in figuur 7, noemt men de amplitude van die trilling. De afstand OB in figuur 7 is de amplitude van een andere trilling.

fig. 6

Vergroting geluidsterkte geeft grotere uitwijking.

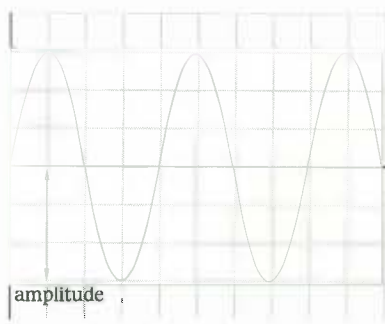
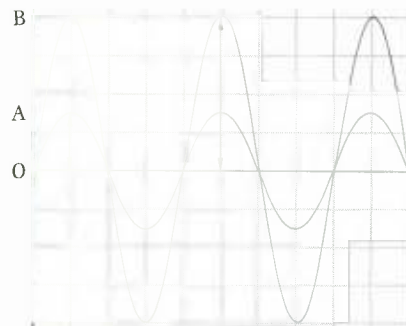


fig. 7

Amplitude OA.
Amplitude OB.



Trillingstijd

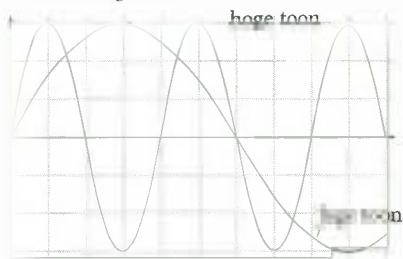
Ook als je de toonhoogte verandert, verandert het beeld op het scherm. Bij lagere tonen zie je minder golven, bij hoge tonen zie je meer golven verschijnen (figuur 8). Dit komt omdat hoge tonen een kleinere trillingstijd hebben dan lage tonen. Hieronder wordt uitgelegd hoe je dat op het scherm van de scoop kunt aflezen.

Eén trilling van de luidsprekerconus bestaat uit één complete heen en weer gaande beweging. De trilling begint in de evenwichtsstand. De conus bereikt eerst de maximale uitwijking naar voren, beweegt daarna terug en passeert weer de evenwichtsstand op weg naar de maximale uitwijking aan de achterkant. Tenslotte is de

trilling compleet als de conus de evenwichtsstand weer bereikt. Op de scoop wordt één complete trilling weergegeven door één berg en één dal. Daarna begint een nieuwe trilling. De tijdsduur van één trilling heet de trillingstijd, aangeduid met de letter T .

Op de scoop kunnen we op de horizontale as de tijdsduur van een trilling bepalen. Elk hokje op het beeldscherm komt overeen met een bepaalde tijdsduur. We

fig. 8
Scoopbeeld van een lage en van een hoge toon.



Frequentie

De toonhoogte wordt bepaald door het aantal trillingen per seconde. Het aantal trillingen per seconde noemt men de frequentie, aangeduid met de letter f . De eenheid van frequentie is de hertz, afgekort als Hz.

De frequentie kun je berekenen met:

$$f = \frac{1}{T}$$

Samenvatting

Lage tonen hebben een lage frequentie en hoge tonen een hoge frequentie:

lage tonen – lage frequentie – grote trillingstijd;

hoge tonen – hoge frequentie – kleine trillingstijd.

Voorbeeld

In figuur 10 zie je het scoopbeeld van een trilling.

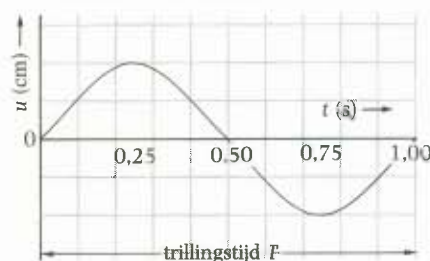
Eén trilling beslaat 4 hokjes. De scoop is zó ingesteld dat één hokje overeenkomt met 0,05 s. De trillingstijd is dus $4 \times 0,05 \text{ s} = 0,2 \text{ s}$. Uit de trillingstijd kun je de frequentie berekenen met de formule

$$f = \frac{1}{T}, \text{ dus } f = \frac{1}{0,2} = 5 \text{ Hz.}$$

berekenen de trillingstijd door die tijdsduur te vermenigvuldigen met het aantal hokjes dat hoort bij één complete trilling (figuur 9).

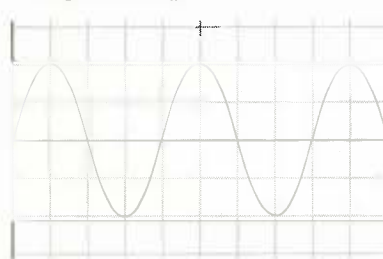
Bij hogere tonen is de trillingstijd kleiner (het aantal hokjes per trilling is kleiner). Bij lagere tonen is de trillingstijd groter (meer hokjes per trilling).

fig. 9
Elk hokje (schaaldeel) komt overeen met 0,1 seconde.



De trillingstijd is de tijdsduur van één trilling. Een trillingstijd van 0,1 s betekent dat in 0,1 seconde één hele trilling wordt uitgevoerd. Eén trilling in 0,1 s komt overeen met 10 trillingen in 1 s. De bijbehorende frequentie is dus 10 trillingen per seconde, genoteerd als: $f = 10 \text{ Hz}$.

fig. 10
Scoopbeeld trilling.



Wanneer het om hoge frequenties gaat wordt kHz (kilohertz) of MHz (megahertz) gebruikt.

1 kHz = 1000 Hz;

1 MHz = 1 000 000 Hz.

Een trilling met een frequentie van 10 Hz voert 10 trillingen per seconde uit. Een trilling met een frequentie van 27 MHz voert 27 000 000 trillingen per seconde uit.

Een trilling in de tijd bekeken

Als we een stemvork met een naald aan het uiteinde met constante snelheid over een beroete plaat trekken, ontstaat er een golfbeweging. We zien een aantal trillingen van de stemvork. Ook het beeld op de scoop geeft een aantal trillingen weer.

De afbeelding die je bij deze proeven krijgt, noemen we een uitwijking-tijddiagram, afgekort u,t -diagram. Hierbij is de uitwijking verticaal uitgezet en de tijd horizontaal.

Voorbeelden

1 Het uitwijking-tijddiagram van de stemvork ziet er uit als in figuur 11. We spreken hier van een gedempte trilling omdat de amplitude steeds kleiner wordt. De

meeste trillingen zijn gedempte trillingen. Een uitzondering hierop zijn de elektrische trillingen die de toongenerator produceert.

2 Het uitwijking-tijddiagram (u,t -diagram) van figuur 12 bevat veel informatie:

- a de amplitude is 3,0 cm;
- b de trillingstijd is 0,4 s;
- c de trilling is ongedempt;
- d je kunt op elk moment de uitwijking meten;
- e je kunt de frequentie uitrekenen:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,4} = 2,5 \text{ Hz.}$$

fig. 11
Een uitwijking-tijddiagram van een gedempte trilling.

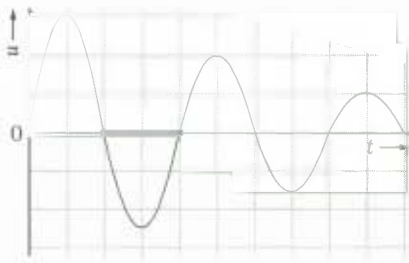
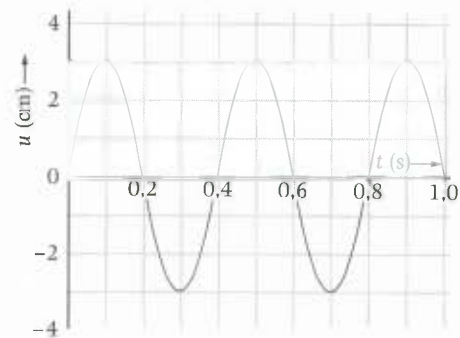


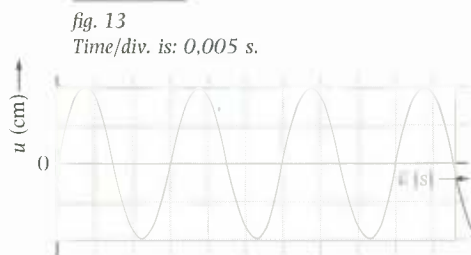
fig. 12
Een uitwijking-tijddiagram van een ongedempte trilling.



grootheid	symbool	eenheid	afkorting
frequentie	f	hertz, kilohertz	Hz, kHz
trillingstijd	T	seconde	s
amplitude	A	centimeter	cm

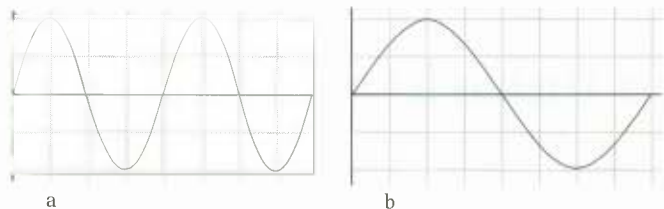
1 In figuur 13 is een scoopbeeld van een trilling getekend. Eén hokje komt overeen met 0,005 s.

- Bepaal de trillingstijd.
- Bereken de frequentie.



2 In figuur 14 zie je de scoopbeelden a en b van twee trillingen. De tijdas (time/div.) is voor beide beelden hetzelfde (time/div. = 'tijd per schaaldeel').
Beredeneer welke van de twee de hoogste frequentie heeft.

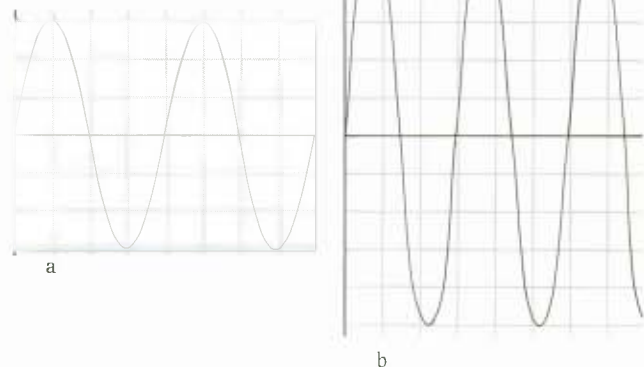
fig. 14
Scoopbeeld a, scoopbeeld b.



3 Met behulp van de scoop maken we u, t -diagrammen van twee geluidsbronnen a en b (figuur 15). De knopen time/div. en volt/div. staan bij beide opnamen op dezelfde stand. De afstand van de geluidsbron tot de microfoon bedroeg in beide gevallen 20 cm.

- Welke van de bronnen brengt de hoogste toon voort?
- Welke bron geeft de grootste geluidssterkte?

fig. 15
Geluidsbron a.
Geluidsbron b.



4 De trillingstijd van een trillende veer bedraagt 0,50 s.

- Hoeveel trillingen voert de veer in 1 s uit?
- Wat is de frequentie van de trilling?
- Hoeveel trillingen voert de veer uit in 3,50 s?

5 De conus van een luidspreker voert 12 000 trillingen uit in 3,00 s.

- Hoe groot is de frequentie?
- Bereken de trillingstijd.

6 In de tabel van figuur 16 is voor een aantal tijdstippen de uitwijking gegeven van een trillende stemvork.

- Hoe groot is de amplitude van de trilling?
- Maak met behulp van de tabel een u, t -diagram in je schrift.

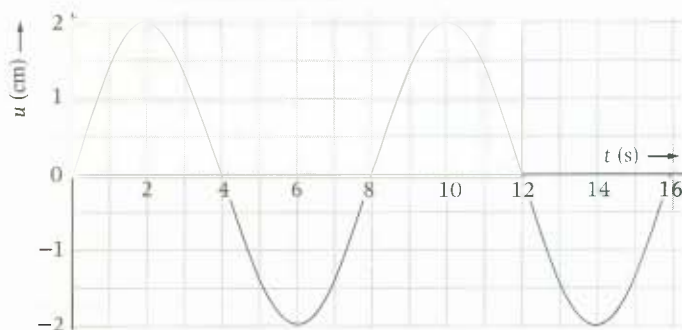
fig. 16
Tabel uitwijking stemvork.

t (ms)	u (mm)
0	0
2,8	0,7
5,7	1,0
8,5	0,7
11,3	0
14,1	-0,7
16,9	-1,0
19,7	-0,7
22,5	0

7 In figuur 17 zie je het u, t -diagram van een trilling.

- Bepaal de amplitude.
- Bepaal de uitwijking op $t = 5$ s.
- Bepaal de trillingstijd.
- Bereken de frequentie.

fig. 17
Uitwijking-tijddiagram.

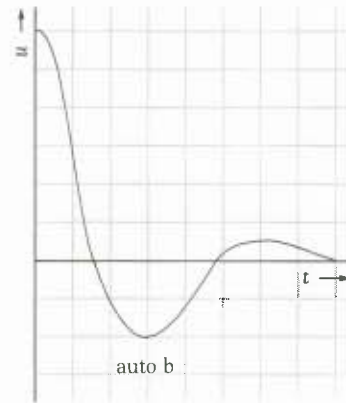
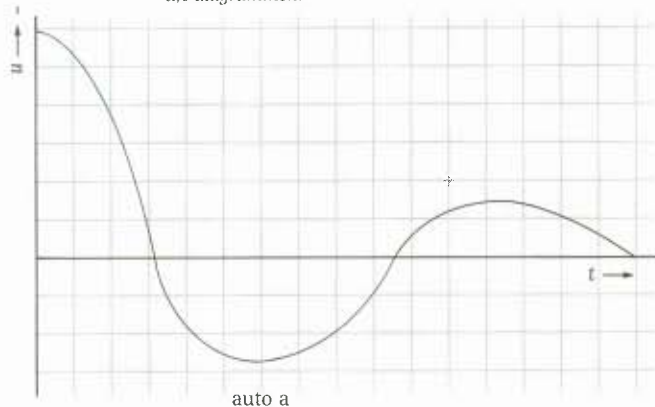


8 Om de schokbrekers van een auto te testen wordt de bumper naar beneden geduwd en vervolgens losgelaten. Bekeken wordt hoe lang het duurt voor de auto is uitgetrild.

In figuur 18 zijn de u,t -diagrammen van twee verschillende auto's getekend.

- Bepaal uit de u,t -diagrammen welke trilling de kleinste trillingstijd heeft.
- Welke trilling heeft de laagste frequentie?
- Bereken welke van de beide auto's de beste schokbrekers heeft.

fig. 18
 u,t -diagrammen.



Blok 13

T3

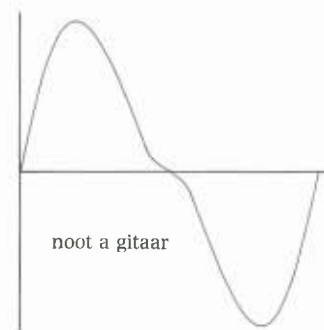
Geluid en muziek

Niet elk geluid klinkt ons als muziek in de oren. Het geluid van de toongenerator klinkt bijvoorbeeld niet echt mooi. Dit komt omdat de toon uit een toongenerator uit één enkelvoudige trilling bestaat. Het u,t -diagram dat je op de scoop ziet, bestaat dan ook uit één enkele sinus.

Wanneer je het u,t -diagram bekijkt van het geluid van een gitaarsnaar (figuur 19), zie je dat het een samengestelde trilling is. Dit komt omdat een toon van een gitaarsnaar uit een aantal verschillende trillingen is opgebouwd. Meestal vinden wij een samengestelde trilling prettiger klinken dan de enkelvoudige sinusvormige trilling van de toongenerator.

Een akkoord op een gitaar (gespeeld op meerdere snaren) klinkt vaak weer mooier dan het geluid van één snaar. Muziek bestaat over het algemeen uit meerdere tonen van verschillende frequenties en amplitudes.

fig. 19
 u,t -diagram van één toon,
gespeeld op een gitaarsnaar.



Klankkleur

Geluiden kunnen niet alleen verschillen in toonhoogte en sterkte, maar ook in klankkleur of timbre (spreek uit: tèmbre). Bijvoorbeeld de klankkleur of het timbre van een blokfluit is anders dan de klankkleur van een piano, ook al wordt op beide instrumenten dezelfde toon gespeeld. Dit verschil zie je ook terug in het u,t -diagram op de scoop (figuur 20 a en b).

Een toon van een muziekinstrument of van je stem bestaat uit een grondtoon en een aantal boventonen. In figuur 21 zie je de toon a' van een gitaar met een frequentie van 440 Hz. Beter gezegd: de grondtoon heeft een frequentie van 440 Hz. De toon is echter naast de grondtoon opgebouwd uit een aantal boventonen. In figuur 21 zijn de grondtoon en één boventoon van 880 Hz apart afgebeeld (deze boventoon is precies één octaaf hoger dan de grondtoon).

De verhouding tussen grondtoon en boventonen verschilt per muziekinstrument en dat verklaart het verschil in klankkleur wat je hoort (en wat je ziet op de scoop).

fig. 20
a u,t -diagram gitaar,
b u,t -diagram fluit.

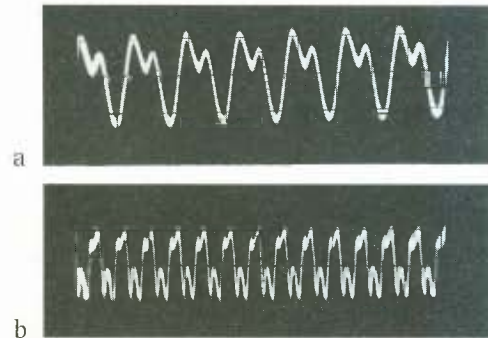
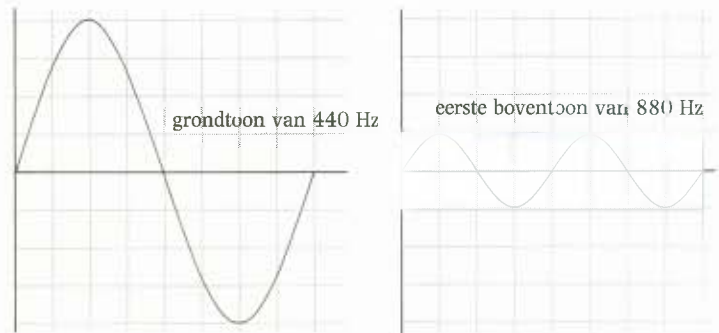


fig. 21



Ons oor kan door de verschillen in klankkleur de verschillende instrumenten van elkaar onderscheiden. Het verschil in klankkleur ligt voor een groot deel aan het soort instrument. Door het trillen van de snaar (gitaar, piano enz.) of het vel (trommel enz.) gaat het instrument zelf ook meetrillen. De klankkast van een gitaar of het klankbord van een piano bepalen daarom voor een

belangrijk deel de klankkleur van het instrument. Het verschil in klankkleur tussen twee instrumenten van *dezelfde* soort (bv. twee violen) wordt, behalve door de kundigheid van de bespeler, ook bepaald door de kundigheid waarmee het instrument gebouwd werd. Een stradivarius zal mooier klinken dan een fabrieksmatig gemaakte viool.

Muziekinstrumenten

Bij veel muziekinstrumenten wordt het geluid veroorzaakt door het in trilling brengen van een snaar. Deze worden daarom *snaarinstrumenten* genoemd. Enkele voorbeelden zijn: gitaar, piano, viool en harp. Bij andere instrumenten wordt het geluid veroorzaakt door de lucht met kracht door een mondstuk van metaal, van hout of van riet te blazen: de *blaasinstrumenten*. Voorbeelden hiervan zijn: trompet en trombone (metalen mondstuk), blokfluit (houten mondstuk) en klarinet, fagot en hobo (rieten mondstuk). Bij een derde groep

instrumenten wordt de lucht door het aanslaan van een strak gespannen vel in trilling gebracht of door op het instrument zelf te slaan: de *slaginstrumenten*. Voorbeelden hiervan zijn: trommel, tamboerijn, bekken, steeldrum en triangel.

Snaarinstrumenten worden na verloop van tijd vals. De snaren worden slapper en daardoor wordt de toon van die snaar lager. Door de snaar aan te draaien wordt de snaarspanning weer verhoogd en kun je de snaar weer

op de juiste toonhoogte stemmen. De toon stijgt door de spanning van de snaar te verhogen. Er zijn nog twee andere manieren om een hogere toon te krijgen: dunneren snaren gebruiken of kortere snaren. Op een gitaar zitten zes even lange snaren van verschillende dikte. De lage tonen op een gitaar worden veroorzaakt door de dikke snaren, de hoge tonen door de dunneren. In een piano zijn de snaren niet alleen verschillend in dikte maar ook in lengte.

Dikke snaren hebben meer massa en zijn daarom moeilijker in beweging te brengen dan dunne snaren. De dikke snaar beweegt trager omdat er meer massa moet bewegen. De frequentie en daardoor de toon zijn bij dikke snaren daarom lager dan bij dunne snaren.

Op een piano zijn er voor elke toon aparte snaren. Op een gitaar of op een viool zitten maar een paar snaren en daarom moeten er met één snaar verschillende tonen gespeeld kunnen worden. Dit doet men door de snaar met de vingers af te klemmen, waardoor er een kleiner stuk snaar in trilling gebracht kan worden en er dus een hogere toon ontstaat.

Resonantie

Als je een trillende stemvork tegen een raam of tegen een tafelblad houdt, hoor je het geluid sterker. Dit komt omdat het raam of de tafel mee gaan trillen. Hierdoor wordt meer lucht in trilling gebracht, waardoor de geluidssterkte toeneemt. Het meetrillen met de geluidsbron noemen we resonantie. Resonantie treedt heel duidelijk op wanneer we een aangeslagen stemvork op een geschikte klankkast plaatsen. De grootte van de klankkast moet bij de frequentie van de stemvork passen, wil de resonantie duidelijk hoorbaar zijn.

Resonantie kan ook nadelig zijn. Soms kunnen de lage tonen uit de basluidspreker ervoor zorgen dat de glazen in de kast gaan meerinkelen.

De werking van je oor berust ook op resonantie. Het

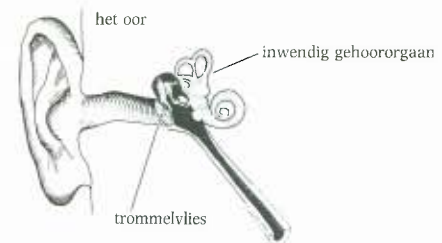
Frequentiebereik

Het menselijk oor kan niet alle frequenties waarnemen. Frequenties beneden 20 Hz en boven 20 kHz kunnen we niet horen. Het gebied dat we wél kunnen horen, noemen we het *frequentiebereik*. Ieder oor heeft een eigen frequentiebereik. Het frequentiebereik van 20 Hz-20 kHz is een gemiddelde voor jonge mensen. Vanaf

fig. 22
Akoestische gitaar.



fig. 23
Het inwendige oor.



geluid dat afkomstig is van de geluidsbron, wordt via de lucht overgebracht naar je oor. Het trommelvlies gaat dan meetrillen. Vanaf het trillende trommelvlies wordt het geluid doorgegeven aan het inwendige gehoororgaan (figuur 23).

ongeveer 18 jaar vermindert de gevoeligheid van je oor voor hogere frequenties, waardoor de bovenste gehoor-grens daalt. Bij oudere mensen kan die grens gezakt zijn tot 10 kHz of nog lager. De onderste gehoor-grens verandert maar weinig en blijft ongeveer 20 Hz. Frequenties boven de gehoor-grens van 20 kHz noemen

we *ultrasoon*. Allerlei diersoorten kunnen ultrasoon geluid wél horen. Een hondefluit werkt volgens dat principe.

Het geluid van luidsprekerboxen wordt mede bepaald door de vorm en het volume van de kast waarin de luidsprekers zijn gemonteerd. Als het goed is, zal de kast weinig meetrillen, maar toch bepaalt de resonantie van de kast de klankkleur van de box. De meeste luidsprekers zijn slechts voor een bepaald frequentiegebied geschikt. Een basluidspreker zal steeds minder geluid produceren als de toonhoogte toeneemt (figuur 24). Een hogetonenluidspreker (tweeter) gaat zelfs snel kapot als je hem belast met lage tonen.

In een luidsprekerbox zitten meestal meerdere luidsprekers: een lagetonenluidspreker, ook basluidspreker of woofer genaamd, een middentonenluidspreker of squaker en een hogetonenluidspreker of tweeter.

In de luidsprekerbox is een elektronisch toonfilter gemonteerd dat ervoor zorgt, dat de verschillende elektrische trillingen bij de juiste luidspreker terecht komen.

Een goede luidsprekerbox produceert bij iedere frequentie dezelfde geluidsterkte. Men kan dit proberen te bereiken door:

- de bouwwijze van de box (bijvoorbeeld een gesloten kast of een kast met een basreflexpoort);

- het toepassen van een meerspeakersysteem (twee of meer luidsprekers in een kast);
- het toepassen van een elektronisch filter (dat ervoor zorgt dat iedere luidspreker het juiste elektrische signaal ontvangt).

fig. 24
Frequentiebereik van een basluidspreker.

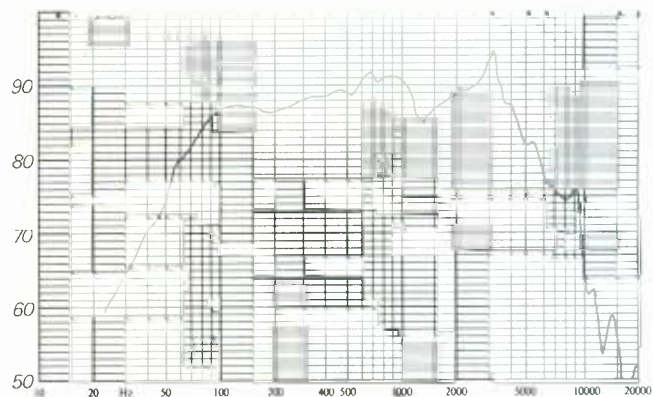


fig. 25
Luidsprekerbox.

Belastbaarheid	:	250 Watt
Continu	:	350 Watt
Muziek	:	30-180 Watt continu
Vermogen versterker	:	8 Ohm
Systeem Impedantie	:	88 dB/1W/1M
Gevoeligheid	:	350/5000 Hz
Scheidingsfrequentie	:	32-20.000 Hz
Frequentiebereik	:	

Luidsprekers	:	
Lagetonenluidspreker	:	2 x 20 cm dubbel coating
Middentonenluidspreker	:	13 cm dubbel coating
Hogetonenluidspreker	:	Isophase type

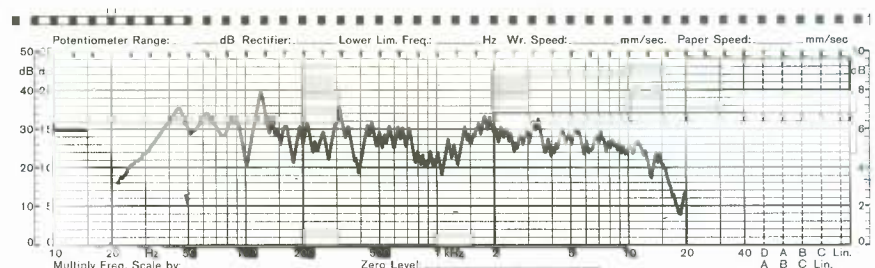


Frequentiekarakteristiek

Men kan de kwaliteit van een luidsprekerbox controleren door een frequentiekarakteristiek op te nemen. De frequentiekarakteristiek is een diagram, waarbij de geluidsterkte (in dB) is uitgezet tegen de frequentie (in Hz). Hierbij wordt aan een box een toon van constante sterkte toegevoerd die oploopt van 0 Hz tot bijv. 30 000 Hz. Door tegelijkertijd het geluid met een microfoon of een dB-meter te registreren, kan men zien bij welke

frequenties de box minder geluid produceert (figuur 26). Op dezelfde manier bepaalt men ook het frequentiebereik van een losse luidspreker (figuur 24). De frequentiekarakteristiek van een box zegt iets over de kwaliteit ervan. Bij een goede box worden alle toonhoogten even sterk weergegeven. De grafiek loopt dan over een groot frequentiebereik horizontaal.

fig. 26
Frequentiekarakteristiek van een box.



1 Een trompet is een klein blaasinstrument. Een sousafoon is een zeer groot blaasinstrument. Wat weet je van de tonen die deze instrumenten voortbrengen?

2 In figuur 27 zie je drie verschillende snaarinstrumenten.

- Hoe zie je aan de lengte van de snaren welk instrument de laagste tonen produceert?
- Welk instrument zal de dunste snaren hebben?
- Kun je aan het formaat van de klankkast zien of het een lagetoneninstrument is of een hogetoneninstrument?
- Licht je antwoord toe.

3 Waarin verschilt de toon van muziekinstrumenten van die van de toongenerator?

- Denk je dat het mogelijk is om een glas kapot te 'zingen'?
- Beredeneer je antwoord. Gebruik hierbij het woord resonantie.

5 Resonantie komt niet alleen bij geluidstrillingen voor. Geef zelf een aantal andere voorbeelden van resonantie.

6 Leg uit dat de werking van het oor op resonantie berust.

- Wat is het maximale frequentiebereik van het menselijk oor?
- Wat betekent dat?

8 In figuur 26 zie je de frequentiekaracteristiek van een luidsprekerbox afgebeeld.

- Bij welke frequenties is de geluidssterkte minder?
- Wat kun je zeggen over de bovengrens van het frequentiebereik?

9 In figuur 28 zie je de frequentiekaracteristiek van een losse luidspreker afgebeeld.

Is dit een:

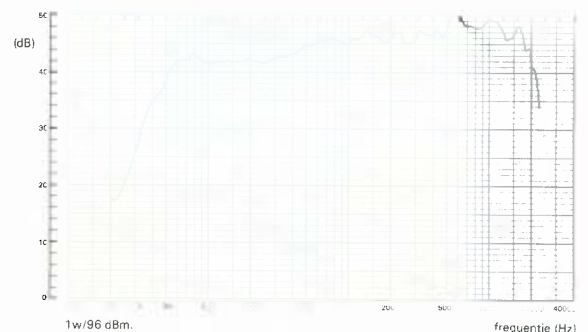
- lagetonenluidspreker?
- middentonenluidspreker?
- hogetonenluidspreker?

Kies het juiste antwoord en licht je keuze toe.

fig. 27
Snaarinstrumenten.



fig. 28
Frequentiekaracteristiek van een losse luidspreker.

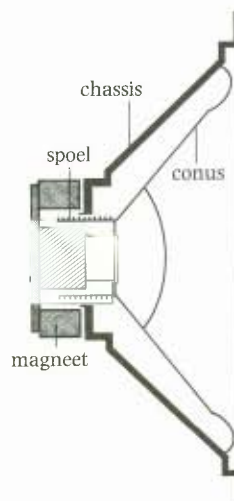


In deze herhaalstof gaan we na hoe geluid ontstaat, hoe het zich uitbreidt en hoe we met behulp van geluidsgolven afstanden kunnen bepalen.

Geluidsbronnen

Veel dingen om ons heen maken geluid. Alles wat geluid maakt noemen we geluidsbronnen. Het ontstaan van geluid is goed na te gaan bij een luidspreker. De heen en weer gaande beweging van de luidsprekerconus (figuur 29) is bij normaal geluid niet te zien. Pas als we de luidspreker op de toongenerator aansluiten en een toon instellen, die zo laag is dat wij hem niet meer horen, kun je de conus zien bewegen. Die beweging brengt de lucht voor (en achter) de luidspreker in trilling. Bij hoorbare tonen brengt de conus de lucht in zeer snelle trilling. Deze luchttrillingen ervaren wij als geluid. Bij alle trillende voorwerpen die geluid voortbrengen gebeurt hetzelfde: de lucht wordt in trilling gebracht en dat ervaren wij via onze oren als geluid.

fig. 29
De luidsprekerconus.



1 Hoe ontstaat geluid?

2 Welke beweging is de oorzaak van geluiden bij de volgende bronnen:

- a Een stilstaande auto met draaiende motor;
- b een radio;
- c een gitaar;
- d een bel?

Voortplanting van geluid

Bij proeven met geluid blijkt dat er altijd een tussenstof nodig is om de trillingen over te brengen. Geluid plant zich goed voort in lucht en in een aantal andere stoffen. Als er heel ver weg een trein nadert kun je het geluid van de trein via de lucht nog niet horen. Maar als je je oor op de rails houdt, hoor je de trein wel aankomen. Het blijkt dat het geluid van de aankomende trein zich voortplant door de rails. De rails zijn nu de tussenstof (medium) die altijd nodig is om geluid van de bron over te brengen naar de ontvanger.

fig. 30
Tabel geluidssnelheid in
verschillende stoffen.

stof	geluidssnelheid	
	in m/s	in km/h
ijzer	5100	18400
koper	3700	13300
glycerol	1920	6920
water	1480	5330
lucht	340	1220

De snelheid waarmee geluid zich voortplant is niet in elke tussenstof hetzelfde. Uit proeven is gebleken dat het geluid zich in lucht voortplant met een snelheid van 340 m/s. In de tabel van figuur 30 is de geluidssnelheid in een aantal stoffen gegeven.

Je kunt verschillende berekeningen uitvoeren met de formule: $s = v_{\text{geluid}} \times t$

grootheid	symbool	eenheid
afstand	s	meter
geluidssnelheid	v_{geluid}	meter per seconde
tijdsduur	t	seconde

3 Op welke manier komt het geluid van de geluidsbron bij de ontvanger?

4 Tijdens een onweer neem je de tijd op tussen het zien van de lichtflits en het horen van de donder: 12 s. De lichtsnelheid is bijna 900 000 maal zo groot als de geluidssnelheid, zodat je de tijd die het licht nodig had om je oog te bereiken mag verwaarlozen. Je kunt nu de afstand tussen jou en het onweer gaan berekenen.

a Welke waarde van de geluidssnelheid uit de tabel van figuur 30 moet je dus gebruiken?

b Bereken op welke afstand het onweer zich van jou bevindt.

5 In de verte zie je een heiblok op een paal terechtkomen. Je meet de tijdsduur vanaf het moment dat je het heiblok op de paal ziet neerkomen tot het moment waarop je het geluid van de klap hoort. Je meet 3,0 s. Bereken de afstand tot de heimachine.

6 Om de geluidssnelheid in water te bepalen doet men de volgende proef: op een bepaalde plaats in zee brengt

men een hoeveelheid dynamiet tot ontploffing. Op 3,7 km daarvandaan vangt men onder water de geluidsgolven op. De tijd tussen het moment van de ontploffing en het moment dat de geluidsgolven waargenomen worden, bedraagt 2,5 s.

a Bereken de geluidssnelheid in water.

b Hoe lang duurt het voordat het geluid van de ontploffing via de lucht bij de waarnemer is?

Geluid kan door voorwerpen of obstakels worden teruggekaatst. Als we iets in een diepe put roepen, horen we even later onze eigen stem: de echo. Van dit verschijnsel maakt men gebruik om vanaf een bepaalde plaats de afstand te meten tot een voorwerp. De geluidstrillingen die door de geluidsbron worden uitgezonden, bereiken het voorwerp en kaatsen terug naar de plaats waar de bron én de geluidsontvanger zich bevinden. De weg die de geluidsgolven afleggen is dan twee maal zo groot als de afstand tot het voorwerp (figuur 31).

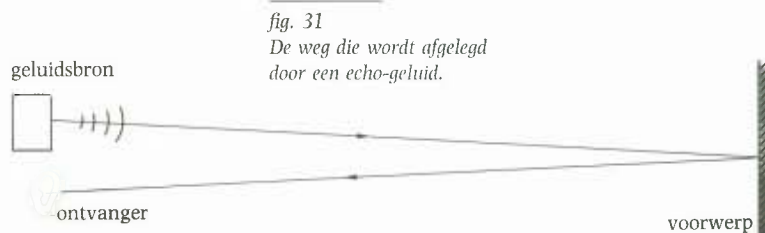
7 In een met water gevulde put wil men de diepte van het water bepalen.

a Beschrijf hoe je met geluidstrillingen de diepte kunt bepalen.

Bij een meting vindt men een tijdsduur van 0,5 seconde tussen het uitzenden van de geluidstrilling vanaf het wateroppervlak tot het ontvangen van de echo.

b Bereken hoe diep de put is.

8 Een zeer groot gebouw staat op een afstand van 510 meter. Bereken hoe lang je op de echo moet wachten.



H2 Geluid en trillingen

In deze herhaalstof behandelen we de belangrijkste begrippen uit dit blok: wat zijn trillingen en wat betekenen de begrippen amplitude, trillingstijd, frequentie en u, t -diagram.

Wat zijn trillingen?

De beweging van de slinger van een klok, de beweging van een dansende veer, de beweging van een luidsprekerconus en de beweging van een aangeslagen snaar zijn bewegingen die we trillingen noemen. Het zijn alle heen en weer gaande bewegingen om een bepaalde evenwichtsstand. De beweging van een trillende stemvork met een naald aan het uiteinde kunnen we vastleggen door de naald met constante snelheid over een beroete plaat of over een carbonpapiertje te trekken. Je ziet dan de trilling verschijnen als een golf-

beweging.

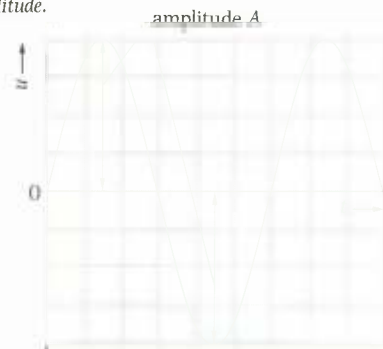
Geluidstrillingen kunnen we zichtbaar maken met behulp van een oscilloscoop, meestal kortweg scoop genaamd. De geluidstrillingen moeten dan eerst worden omgezet in elektrische trillingen. Dat gebeurt met behulp van een microfoon. Om geluiden van een bepaalde toonhoogte te krijgen gebruiken we een toongenerator. Op het beeldscherm van de scoop zie je dan net zo'n beweging als bij de stemvork op het beroete glasplaatje.

Amplitude

Je ziet een rechte lijn op het beeldscherm van de scoop als we geen signaal aan de scoop toevoeren. Dit is de evenwichtsstand. Voeren we een signaal toe, dan ontstaat de golvende lijn die bij de geluidstrilling hoort. Deze lijn wijkt af van de evenwichtsstand. Je ziet dat de bergen en de dalen even groot zijn, of meer natuurkundig: de maximale uitwijking in de bergen en de dalen is even groot. De maximale uitwijking noemen we de amplitude, aangeduid met de hoofdletter A (figuur 32).

Wanneer we de geluidssterkte vergroten zien we op de scoop de amplitude groter worden. De bergen en dalen (en de nulpunten) blijven daarbij op hun plaats.

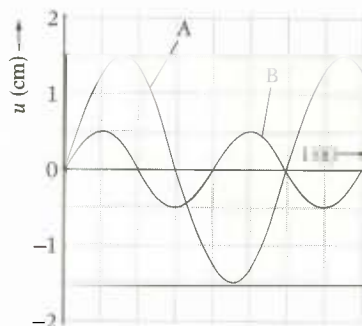
fig. 32
De amplitude.



1 In figuur 33 zijn in een u, t -diagram de uitwijkingen getekend van twee trillingen: A en B.

- Bepaal de amplitude van beide trillingen.
- Welke trilling heeft de grootste amplitude?

fig. 33
Twee trillingen: A en B met een verschillende amplitude.



2 Van een trillende veer is in de tabel van figuur 34 de uitwijking gegeven op een aantal tijdstippen. Op $t = 0$ s is de veer in zijn evenwichtsstand.

Bepaal de amplitude.

fig. 34
Uitwijkingen van een trillende veer.

t (in s)	u (in cm)
0	0
0,1	0,5
0,2	0,7
0,3	0,8
0,4	0,7
0,5	0,5
0,6	0

Trillingstijd

Een blokje hangt stil aan een touw (dus in de evenwichtsstand). We geven het een zetje naar rechts. Even later beweegt het blokje naar links en komt dan langs de evenwichtsstand. Na de uiterste stand links gaat het blokje weer naar rechts terug. Bij de evenwichtsstand stoppen we het blokje. De beweging die het blokje nu gemaakt heeft noemen we één hele trilling. Op de scoop wordt één trilling weergegeven door één berg en één dal. De tijdsduur van één zo'n trilling noemen we de trillingstijd, aangeduid met de letter T .

Wanneer we de toonhoogte met de toongenerator verhogen zien we op het beeldscherm van de scoop meer trillingen verschijnen. De tijdsduur van één trilling, de trillingstijd, wordt dan kleiner.

Op de scoop komt elk hokje in horizontale richting overeen met een ingestelde tijdsduur, meestal aangegeven als *time/div.* (tijd per schaaldeel).

Je kunt de trillingstijd berekenen door het aantal hokjes

te tellen van één trilling en dan te vermenigvuldigen met de tijdsduur die bij één hokje (schaaldeel) hoort.

Voorbeeld (figuur 35)

De *time/div.* knop staat ingesteld op 0,2 s. Eén trilling bestaat uit 4,5 hokjes. De trillingstijd is dan $4,5 \times 0,2 = 0,9$ s.

3 Op het scoopbeeld (figuur 36) zie je een trilling weergegeven. De *time/div.* knop staat ingesteld op 5 ms (milliseconde).

Bereken de trillingstijd.

4 Bereken de trillingstijd van de trilling (figuur 37) als de *time/div.* knop ingesteld is op 1 ms.

fig. 35
Eén hokje (schaaldeel) komt overeen met 0,2 s.

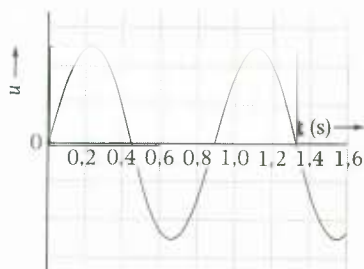


fig. 36
Time/div. = 5 ms.

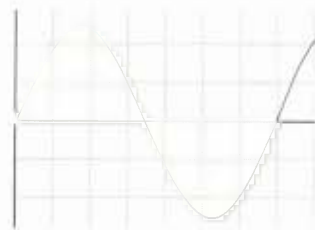
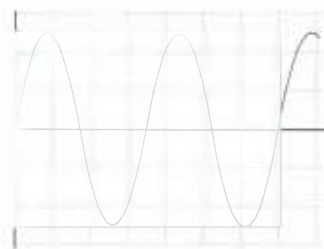


fig. 37
Time/div. = 1 ms.



Frequentie

De frequentie is het aantal trillingen per seconde. Het symbool voor de frequentie is de letter f , de eenheid is de hertz, afgekort Hz. $1 \text{ Hz} = 1$ trilling per seconde. Hoge tonen hebben een hogere frequentie dan lage tonen. De formule voor de frequentie is:

$$f = \frac{1}{T}$$

Als je een toon verhoogt, zal het aantal trillingen per seconde toenemen. De frequentie wordt dan groter.

Samenvatting

Hoe groter de geluidsterkte, hoe groter de amplitude.
Hoe groter de frequentie, hoe hoger de toon, hoe kleiner de trillingstijd.

Lage tonen: lage frequentie, grote trillingstijd.

Hoge tonen: hoge frequentie, kleine trillingstijd.

In de tabel (figuur 38) zijn alle begrippen met bijbehorende symbolen en eenheden bij elkaar gezet.

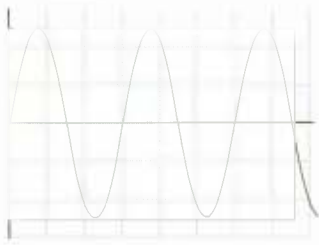
fig. 38
Tabel symbolen en eenheden.

grootheid	symbool	eenheid
uitwijking	u	cm of m
amplitude	A	cm of m
trillingstijd	T	s
frequentie	f	Hz (hertz)

5 Eén trilling van een trillende snaar duurt 0,5 s. Bereken de frequentie.

6 Een trillende veer voert in 3 s 12 trillingen uit. Bereken de frequentie.

fig. 39
Scoopbeeld geluidstrilling.
time/div.knop op 10 ms
ingesteld.



Het u,t -diagram

De figuur op het scherm van een oscilloscoop noemt men een uitwijking-tijddiagram, of korter: een u,t -diagram. De uitwijking staat op de verticale as en de tijd op de horizontale as. In een u,t -diagram kun je op elk tijdstip de uitwijking bepalen.

In figuur 41 zie je een voorbeeld van een uitwijking-tijddiagram. Zo'n diagram bevat veel informatie over de trilling:

- a de uitwijking op elk tijdstip;
- b de amplitude of maximale uitwijking is 4,0 cm (op $t = 0,4$ s, $t = 1,2$ s en $t = 2,0$ s);
- c de trillingstijd $T = 1,6$ s;
- d de frequentie f kunnen we berekenen met de formule

$$f = \frac{1}{T}$$

10 In figuur 42 is het u,t -diagram van een trilling afgebeeld.

- a Bepaal de amplitude.
- b Bepaal de trillingstijd.
- c Bereken de frequentie.
- d Bepaal de uitwijking op $t = 400$ ms.

7 De frequentie van een toon is 200 Hz.

a Hoe groot is het aantal trillingen per seconde?

b Bereken de trillingstijd.

8 Op het scoopbeeld (figuur 39) zie je een opname van een geluidstrilling. De time/div.knop staat ingesteld op 10 ms.

a Bepaal de trillingstijd.

b Bereken de frequentie.

9 Op de scoop is een trilling afgebeeld met een trillingstijd van 1,2 s (figuur 40).

a Hoe is de time/div.knop ingesteld?

b Bereken de frequentie.

fig. 40



fig. 41
Voorbeeld u,t -diagram.

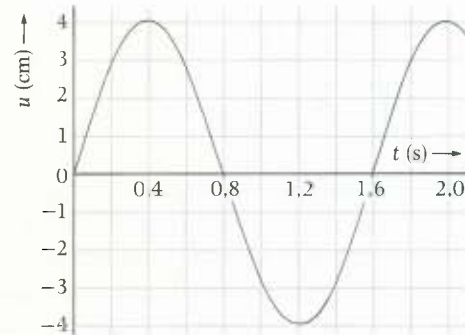
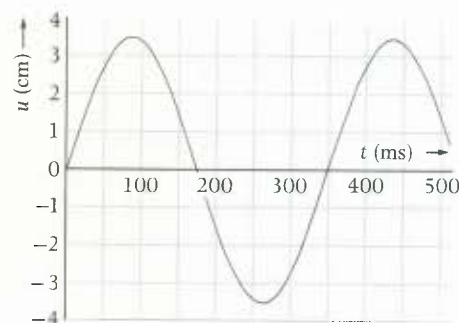


fig. 42
 u,t -diagram.



Gedempte trilling

De meeste trillingen zijn gedempte trillingen. Als je een snaar van een gitaar aanslaat zal de toon langzaam wegsterven. Een slingerend blokje zal uiteindelijk stil komen te hangen. De maximale uitwijking (amplitude) wordt steeds kleiner. Dit is ook te zien in het u, t -diagram van een gedempte trilling (figuur 43).

11 Figuur 43 is het u, t -diagram van een gedempte trilling.

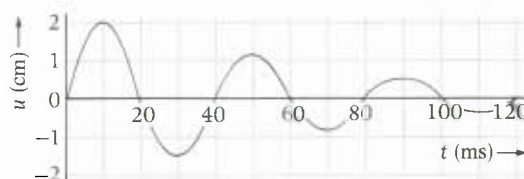
a Wat verandert er aan de trillingstijd van een gedempte trilling?

b Bereken de frequentie.

c Waarom zijn de meeste trillingen gedempte trillingen?

fig. 43

u, t -diagram van een gedempte trilling.



Blok 13

H3

Geluid en muziek

In deze herhaalstof gaan we na wat de volgende begrippen betekenen:

klankkleur,

resonantie,

frequentiekenarakteristiek,

frequentiebereik.

Klankkleur

Elk muziekinstrument is te herkennen aan zijn eigen klank. Daarom kun jij een piano onderscheiden van een gitaar, ook al wordt op beide instrumenten dezelfde toon gespeeld. We zeggen dat elk instrument zijn eigen klankkleur heeft. Wanneer je op de scoop het u, t -diagram bekijkt van dezelfde toon, telkens gespeeld op andere soorten instrumenten, valt je op dat er telkens

een ander beeld ontstaat. Het blijkt dat instrumenten niet één enkelvoudige toon voortbrengen van één frequentie, maar dat er meerdere tonen met verschillende frequenties tegelijk worden geproduceerd. Omdat dit voor ieder instrument anders is, verschilt de klankkleur per soort instrument.

Resonantie

Resonantie ontstaat als andere voorwerpen gaan mee-trillen. Het geluid van de trilling wordt versterkt als er door resonantie meer lucht in trilling wordt gebracht. Een trillende stemvork zonder klankkast is nauwelijks te horen. Op zijn klankkast geplaatst is hij duidelijk te horen.

1 Een snaar, gespannen over een sigarenkistje, klinkt anders dan een snaar op een gitaar. Geef hiervoor een verklaring.

2 Leg uit waarom het trillen van een asbakje in een rijdende auto op resonantie berust.

Frequentiekarakteristiek

Een frequentiekarakteristiek is een diagram dat informatie geeft over de kwaliteit van een luidsprekerbox óf over jouw oor. Er bestaan opname- en weergavekarakteristieken. In een frequentiekarakteristiek is horizontaal de frequentie uitgezet en verticaal de geluidssterkte. Een luidspreker geeft niet elke toonhoogte (frequentie) even goed weer. Het frequentiegebied waarbinnen een luidspreker de toon goed weergeeft, noemen we het frequentiebereik. Om het frequentiebereik van een luidspreker te bepalen neemt men een frequentiekarakteristiek van de luidspreker op (figuur 44). Hiertoe laat men de luidspreker tonen van constante sterkte (volgens de scoop!) weergeven, in frequentie oplopend van bijvoorbeeld 20 Hz tot 20 000 Hz. Tegelijkertijd wordt ook de geluidssterkte, in dB, van die luidspreker opgenomen.

In de frequentiekarakteristiek van de luidspreker kun je dan zien in welk frequentiegebied de luidspreker het beste werkt (figuur 44).

Op dezelfde wijze wordt een frequentiekarakteristiek van een complete luidsprekerbox opgenomen (figuur 45).

Als de luidsprekers in de box met behulp van een zogenaamd scheidingsfilter goed op elkaar zijn afgestemd, zal de frequentiekarakteristiek in een groot frequentiegebied min of meer recht lopen.

fig. 44
Frequentiekarakteristiek van een middentonenluidspreker.

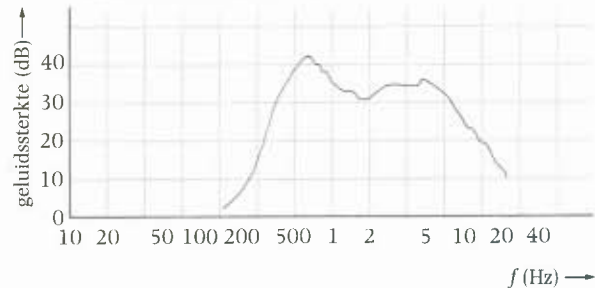
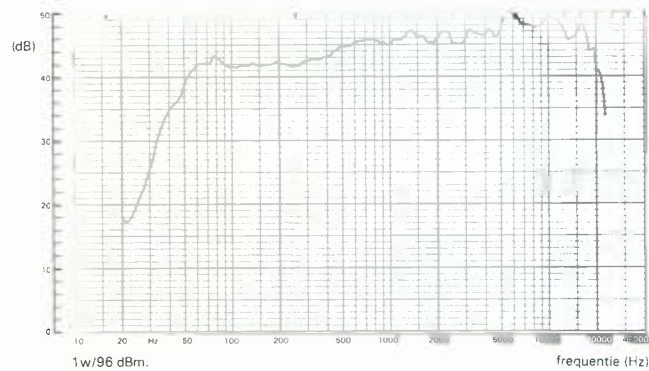


fig. 45
Frequentiekarakteristiek van een luidsprekerbox.



3 Geef met eigen woorden weer wat een frequentiekarakteristiek is.

4 Hoe kun je aan de frequentiekarakteristiek in figuur 44 zien dat we te maken hebben met een middentonenluidspreker?

5 Waarom is het niet nodig de frequentiekarakteristiek beneden 20 Hz en boven 20 000 Hz op te nemen?

6 De grafiek in de frequentiekarakteristiek uit figuur 45 vertoont op sommige plaatsen een duidelijke uitwijking naar beneden.

a Leg uit wat dat betekent.

b Geef hiervoor een verklaring.

E1 Wat zijn geluidstrillingen?

In deze extrastof gaan we na wat geluidstrillingen eigenlijk zijn en hoe geluid zich voortplant. Ook zullen we het hebben over geluidsdruk en geluidsintensiteit.

Tenslotte bestuderen we het *dopplereffect*: het verschijn-

sel dat optreedt als een bewegende geluidsbron je passeert. Denk maar aan het geluid van een voorbij rijdende motor, waarvan de toonhoogte opeens verandert terwijl hij je passeert.

Geluidstrillingen: wat trilt er eigenlijk?

We weten uit de basisstof dat geluid ontstaat door trillende lucht.

Bij lage tonen, dus tonen met een lage frequentie, kun je de conus van de luidspreker zichtbaar zien trillen. Het effect van de conus op de lucht kun je nabootsen met een slappe veer. Geef je de veer een duw in de lengterichting, dan zie je dat de windingen vlak bij je hand eerst dichtbij elkaar komen en daarna uit elkaar gaan bewegen. Even later doen de windingen verderop precies hetzelfde. De duw wordt als het ware doorgegeven (figuur 46). Dit verschijnsel noemen we een *lopende golf*.

Iets dergelijks gebeurt met de omringende lucht bij trillende voorwerpen. Voor de conus van een luidspreker bevinden zich luchtmolekules (figuur 47). Beweegt de conus naar voren, dan worden de luchtmolekules dichter op elkaar gedrukt (verdichting). Deze verdichting breidt zich naar alle kanten uit in de lucht en bereikt tenslotte ons oor.

Als de conus naar achteren beweegt, krijgen de luchtmolekules voor de luidspreker meer ruimte (verduunning). Ook deze verduunning plant zich naar alle kanten voort.

Het aantal verdichtingen en verduunningen dat per seconde ontstaat is gelijk aan de frequentie van de trilling (figuur 48). Eén trilling bestaat uit één verdichting plus één verduunning. Bij een toon met een frequentie van 50 Hz zullen er 50 verdichtingen en 50 verduunningen per seconde worden gevormd.

De verdichtingen en verduunningen van de lucht brengen het trommelvlies in ons oor in beweging. Geluidstrillingen planten zich in alle richtingen even snel voort, dus bolvormig. Dit is in het dagelijks leven niet gemakkelijk waar te nemen, omdat het geluid door allerlei voorwerpen wordt weerkaatst. Het is enigszins mogelijk geluidstrillingen een bepaalde richting te geven. Hiervan wordt gebruik gemaakt bij een megafoon.

fig. 46
Lopende golf in een slappe veer.



fig. 47
Eenvoudige voorstelling van de plaats van de luchtmolekules voor een luidspreker.

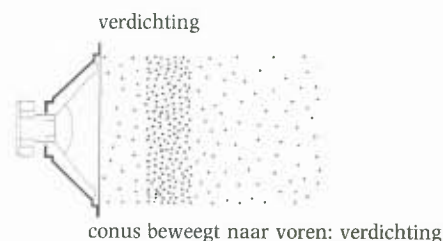
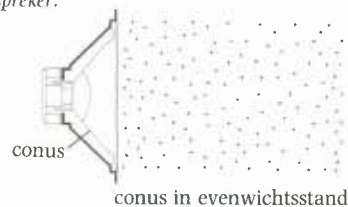


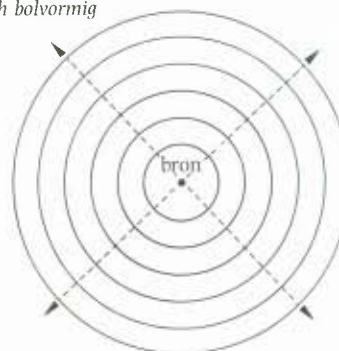
fig. 48

Verdichtingen en verdunningen. Bij een frequentie van 50 Hz zullen er per seconde 50 verdichtingen en vijftig verdunningen passeren.



fig. 49

Geluid plant zich bolvormig voort.



Geluidsdruk en geluidsintensiteit

De verdichtingen en verdunningen van de lucht zorgen voor kleine variaties in de luchtdruk. We kunnen daarom ook spreken van geluidsdruk. Onder druk verstaan we de kracht per vierkante meter. De geluidsdruk wordt daarom uitgedrukt in newton per vierkante meter (N/m^2).

Bij geluidsmetingen legt men meestal de geluidsintensiteit I vast, de energie die per seconde een oppervlak van 1 vierkante meter passeert. De geluidsintensiteit wordt uitgedrukt in watt per vierkante meter (W/m^2). De decibel is hiervan afgeleid.

Het zwakste geluid dat een mens nog kan horen (de drempelwaarde) komt overeen met een geluidsintensiteit van 10^{-12} W/m^2 (= één biljoenste).



Het dopplereffect

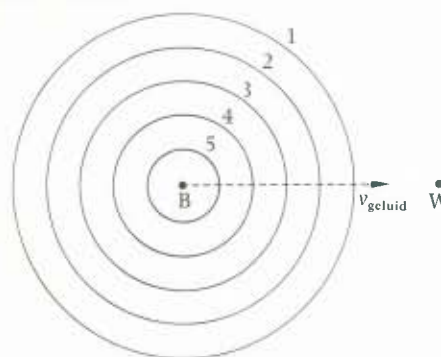
Als je langs een weg staat en er gaat een snelle motorrijder voorbij dan hoor je de toonhoogte van de motor plotseling dalen als hij je gepasseerd is. Dit verschijnsel is ook goed waar te nemen bij ziekenauto's en politieauto's met loeiende sirene.

We nemen van een geluidsbron die ons nadert een hogere toon waar dan wordt uitgezonden. Van een bron die zich van ons verwijderd, is de waargenomen toon lager dan die wordt uitgezonden. Dit verschijnsel heet het dopplereffect, genoemd naar de Oostenrijkse wis- en natuurkundige Christian Johann Doppler (1803-1853).

Vanuit een stilstaande bron zullen de verdichtingen en verdunningen zich cirkelvormig voortplanten. In figuur 49 en 50 zijn de verdichtingen als cirkels weergegeven. De cirkels planten zich voort met de snelheid van het geluid.

fig. 50

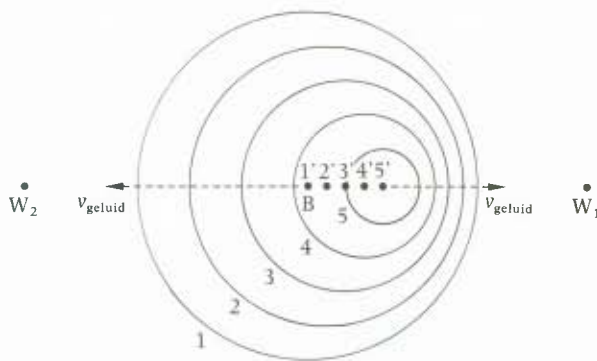
Stilstaande bron B en stilstaande waarnemer W.



De verdichting nr. 1 is het eerst uitgezonden en heeft de grootste afstand afgelegd. De verdichtingen passeren de stilstaande waarnemer W met de geluidssnelheid. W

hoort evenveel trillingen per seconde als er per seconde door de bron zijn uitgezonden. De waargenomen frequentie is gelijk aan de uitgezonden frequentie. Beweegt de bron B (figuur 51), dan wordt elke volgende verdichting op een andere plaats uitgezonden. 1' stelt de plaats voor waar de bron zich het eerst bevond. Daarna bevond de bron zich op plaats 2' enz. Cirkel 1 is de verdichting die de bron op plaats 1' heeft uitgezonden, cirkel 2 is de verdichting die vanuit plaats 2' is uitgezonden, enzovoort.

fig. 51
Bewegende bron B.



Bij waarnemer W_1 , waar de bron zich naartoe beweegt, passeren per seconde méér verdichtingen dan er per seconde door de bron worden uitgezonden, want de verdichtingen liggen nu dichter bij elkaar dan wanneer de bron stilstaat (vergelijk figuur 51 met figuur 50). De naar W_1 bewegende golven hebben daardoor een grotere frequentie (ze volgen elkaar sneller op), zodat de waarnemer W_1 een hogere toon hoort.

Waarnemer W_2 , waar de bron zich vanaf beweegt, ontvangt minder geluidsgolven per seconde, waardoor de waargenomen frequentie lager is. Waarnemer W_2 hoort dus een lagere toon.

Het dopplereffect treedt ook op als de waarnemer beweegt en de bron stilstaat. Ook dan zal het aantal trillingen per seconde toe- of afnemen.

Algemeen geldt dus:

Als de afstand tussen een geluidsbron en een waarnemer afneemt, hoort de waarnemer een hogere toon; neemt de afstand toe, dan is de waargenomen toon lager.

De verandering van de frequentie wordt groter als de snelheid van de bron ten opzichte van de waarnemer groter is.

Als de geluidsbron de waarnemer op enige afstand passeert, is er een geleidelijke overgang van een ver-

hoogde naar een verlaagde toon. Dit komt omdat de snelheid van de bron ten opzichte van de waarnemer (of omgekeerd) dan geleidelijk verandert.

1 Je hoort 3 seconden lang een toon van 1.0 kHz. Hoeveel verdichtingen van de lucht zijn er in jouw oor aangekomen?

2 Een poreuze wand van zacht materiaal dempt het geluid goed.

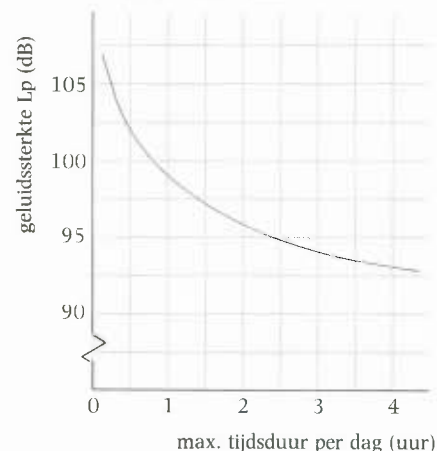
Geef hiervoor een verklaring met behulp van de verdichtingen en verdunningen in de lucht.

3 Verklaar waarom geluid steeds zwakker wordt naarmate de afstand toeneemt.

4 Een popgroep produceert een geluidsstrekte van 100 dB.

Ga met behulp van het diagram van figuur 52 na hoe lang je maximaal naar de muziek van deze popgroep zou mogen luisteren.

fig. 52
Aanbevolen maximale
verblijftijd per geluidsniveau.



5 Verklaar waarom een waarnemer een gelijkblijvende lagere toon hoort als de bron zich met constante snelheid van hem verwijdt (W_2 uit figuur 51).

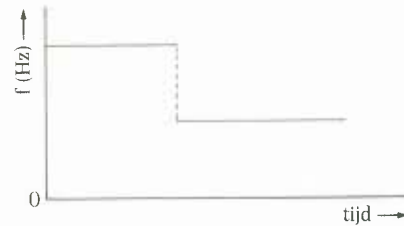
6 Wat hoort een waarnemer die zich met constante snelheid van een stilstaande bron verwijdt?

7 Geef een verklaring waarom het dopplereffect nauwelijks is te horen bij een op grote hoogte overvliegend vliegtuig.

8 Een motorrijder rijdt langs een stilstaande waarnemer. In het diagram van figuur 53 is de verandering van de frequentie van het geluid van de motor weergegeven zoals de waarnemer die hoort.

- a Bewoog de motorrijder zich dicht langs de waarnemer of passeerde hij de waarnemer op grote afstand?
b Neem het diagram over en geef aan wat de frequentie van de geluidsbron is, die de motorrijder zelf waarneemt.

fig. 53
Frequentieverandering
waargenomen door waarnemer W.



9 Carla bevindt zich op enige afstand van de weg waarop een motorrace wordt gehouden. Op een gegeven moment passeert er een motor met hoge snelheid.

a Geef in een diagram weer hoe Carla de frequentieverandering waarneemt.

- b Geef in het diagram het tijdstip aan waarop de motor Carla passeert.

Blok 13

E2

De luidspreker

Luidsprekers zijn er in vele soorten en maten. Grofweg kun je ze indelen naar het frequentiebereik waarin ze het beste werken:

- de lagetonenluidspreker, basluidspreker of woofer;
- de middentonenluidspreker of squaker;
- de hogetonenluidspreker of tweeter.

Een luidspreker bestaat meestal uit vier onderdelen:

- de conus (= de kegel);
- een spoel op de punt van de conus;
- een ringvormige magneet;
- het chassis waaraan de onderdelen zijn bevestigd.

Bij een basluidspreker zijn de bovengenoemde onderdelen het beste te zien (figuur 54). Een tweeter is meestal zo gebouwd dat alleen nog het membraan (het materiaal dat de lucht in trilling brengt) zichtbaar is.

fig. 54
Doorsnede van een luidspreker.

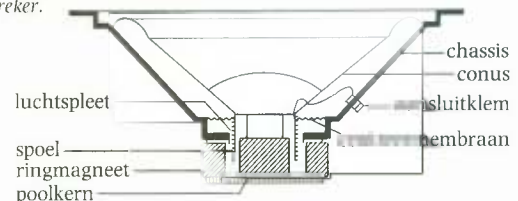
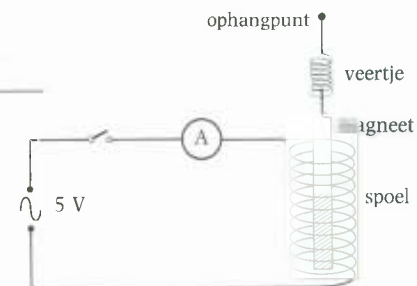


fig. 55



1 Bekijk een luidspreker, waarvan de conus is losgesneden. Je ziet dan de spoel, die om het uiteinde van de conus is gewikkeld. De spoel zit in een dunne spleet. De kern en de buitenrand zijn gemaakt van magnetisch materiaal. De spoel moet zeer nauwkeurig zijn bevestigd, omdat er anders vervorming van het geluid kan optreden.

Ook zie je dat de spoel met twee stroomdraden vastzit aan het chassis. Op deze draden worden de luidsprekersnoeren aangesloten.

In opdracht 2 leer je waar de spoel voor dient. De spoel is het belangrijkste en kwetsbaarste onderdeel van de luidspreker.

2 Benodigd materiaal: spoel (600 windingen), drukschakelaar, stroommeter, magneet, slappe veer, voedingskast met gelijk- en wisselspanning.

- a Maak de opstelling volgens het schema in figuur 55.

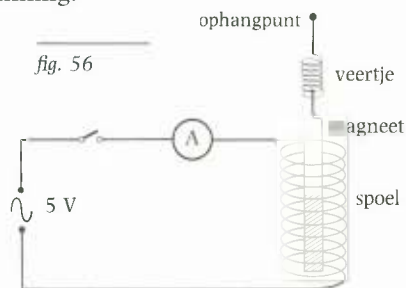
Opmerking: zorg ervoor dat de magneet zo is opgehangen dat hij vrij op en neer kan bewegen.

- b** Stel de voedingskast in op 5 V gelijkspanning en druk even op de schakelaar.
- c** Wat gebeurt er met de magneet? Let hierbij ook op de stroommeter.
- d** Verwissel de plus- en de min-aansluiting op de spoel en druk op de schakelaar. Kijk goed wat er gebeurt. Let ook weer op de stroommeter.
- e** Beschrijf wat je hebt gezien.

De spoel wordt magnetisch als er een elektrische stroom door loopt. Het aantrekken of afstoten van de magneet hangt af van de stroomrichting in de spoel. Bij een luidspreker zit de magneet vast en beweegt de spoel in de magneet. Als je een gelijkspanning op een luidspreker aansluit, zul je geen geluid horen, omdat de conus alleen naar binnen of naar buiten beweegt. Hij gaat geen trilling uitvoeren.

Bij wisselspanning wisselt de stroom steeds van richting. Bij het lichtnet gebeurt dat met een frequentie van 50 Hz.

- 3 Bedenk wat er gebeurt met de magneet uit opdracht 2 als we wisselspanning gebruiken in plaats van gelijkspanning.



- 4a** Maak een opstelling volgens het schema in figuur 56.

Opmerking: Neem een stroommeter die geschikt is voor wisselstroom.

- b** Stel de voedingskast in op 5 V wisselspanning en druk op de schakelaar. Let ook op de stroommeter.
- c** Verwissel de aansluitingen op de spoel en druk op de schakelaar. Let ook weer op de stroommeter.
- d** Druk op de schakelaar en voel aan de magneet.
- e** Beschrijf wat je hebt waargenomen.

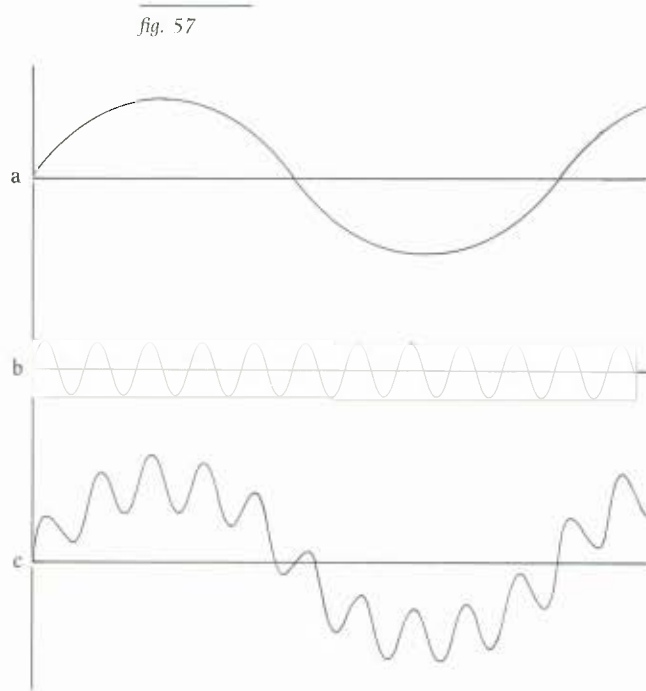
Bij gebruik van wisselspanning zal de magneet zeer snel aangetrokken en afgestoten worden. Het maakt dan ook niet uit of je de aansluitingen op de voedingskast

omwisselt. Het aantrekken en afstoten is haast niet te zien, maar wel te voelen. Je voelt de trilling met een frequentie van 50 Hz.

Het signaal van een versterker bestaat ook uit een wisselspanning, maar de frequentie en de amplitude daarvan veranderen steeds. Het signaal wordt gevormd uit trillingen met meerdere frequenties. De trillingen worden bij elkaar opgeteld en dat signaal wordt naar de spoel van de luidspreker gestuurd. Door de steeds veranderende stroom wordt de spoel in de magneetspleet afgestoten en aangetrokken. De lucht wordt door de conus in trilling gebracht, waardoor wij het geluid kunnen horen.

Het optellen van trillingen met verschillende frequenties kun je je zo voorstellen:

Een lage toon heeft het u,t -diagram van figuur 57a, een hoge toon het u,t -diagram van figuur 57b. Opgeteld krijg je het u,t -diagram van figuur 57c.



De conus maakt dan een trillende beweging met een lage frequentie, maar tegelijkertijd ook een trilling met een hoge frequentie. De signalen die naar de spoel gestuurd worden bij het weergeven van bijvoorbeeld een concert, zijn natuurlijk nog veel ingewikkelder dan hier is voorgesteld.

- 5 Gebruik dezelfde opstelling als in het schema van figuur 55 bij opdracht 2. Sluit de spoel zo aan dat de magneet wordt aangetrokken; gebruik dus weer gelijkspanning.

- a Stel de voedingskast in op een spanning van 5 V en druk op de schakelaar. Let op de magneet.
- b Stel de voedingskast nu in op een spanning van 1 V en druk op de schakelaar.
- c Beschrijf het verschil tussen de aantrekking van de magneet bij onderdeel a en bij onderdeel b.

De grootte van de spanning bepaalt de kracht waarmee de magneet wordt aangetrokken: hoe groter de span-

ning, hoe groter de magnetische kracht.

Bij een geluidssignaal bepaalt de geleverde spanning hoe ver de conus naar voren of naar achteren beweegt. Hoe groter de uitslag van de conus, hoe groter de geluidssterkte. Met andere woorden: de grootte van de spanning bepaalt de amplitude van de geluidstrilling en dus de geluidssterkte. Het signaal voor de luidspreker varieert niet alleen in frequentie maar ook in spanning.

Blok 13

E3

Sirenes en sonar

1 Wanneer lucht door de gaatjes van een snel ronddraaiende schijf wordt geblazen ontstaat er een sireneachtig geluid.

- a Beschrijf hoe hierbij de geluidstrillingen ontstaan. Het toerental van een sirene wordt ingesteld op 600 omwentelingen per minuut. Er zitten 44 gaatjes langs de rand van de schijf (figuur 58). De toonhoogte van de sirene is nu dezelfde als die van een stemvork, die men in de muziek gebruikt om instrumenten te stemmen.
- b Bereken de frequentie van die stemvork.

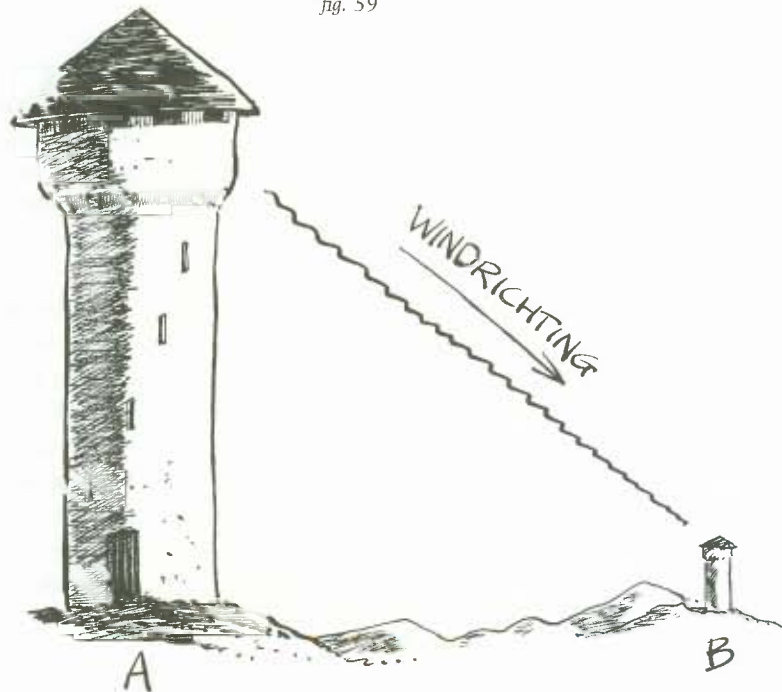
fig. 58
De sirene.



2 De afstand tussen twee hoge torens A en B bedraagt 11,22 km. Er waait een wind van A naar B. Hierdoor heeft het geluid 33 s nodig om van A naar B te kunnen komen. Van B naar A is 34,0 s nodig (figuur 59).

- a Bereken de snelheid van het geluid van A naar B en van B naar A.
- b Bereken de geluidssnelheid in stilstaande lucht.
- c Bereken de windsnelheid op die dag.

fig. 59



3 Je staat op enige afstand van een bosrand, die jouw stemgeluid terugkaatst. Je roept 'hallo' in de richting van de bosrand, en hoort na die roep nog juist de echo van de laatste lettergreep 'lo'. Gegeven is dat het uitspreken van één lettergreep 0,2 s duurt.

- Hoelang is die klank 'lo' in totaal onderweg geweest?
- Bereken hoever je van die bosrand staat. Gebruik tabel 2 uit T1.

4 Vanaf een schip wordt met behulp van sonar een deel van de zeebodem in kaart gebracht. Sonar is apparatuur, waarmee ultrasoon geluid wordt uitgezonden dat na terugkaatsing weer kan worden opgevangen. Sonar is een afkorting van 'SOund NAvigation and Ranging'.

De geluidssnelheid in water is 1500 m/s. Voor een bepaald stuk doet men om de 200 meter 5 metingen. Hierbij meet men de tijd tussen het uitzenden en het ontvangen van het ultrasone signaal. De metingen staan vermeld in de tabel van figuur 60.

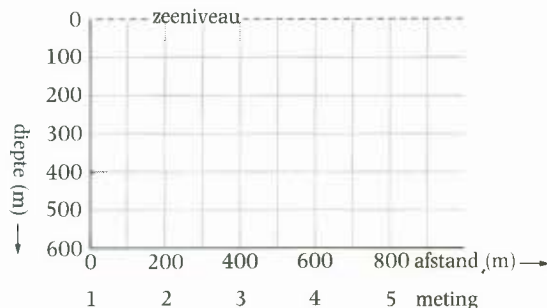
- Neem de tabel van figuur 60 over in je schrift. Bereken met de gegevens uit de tabel voor de 5 metingen de afstand tot de zeebodem.
- Maak in je schrift een diagram zoals in figuur 61 en schets daarin hoe dat stuk van de zeebodem er uit ziet.

fig. 60

meting	tijd in s	afstand in m
1	0,8	
2	0,6	
3	0,3	
4	0,5	
5	0,7	

fig. 61

Diagram zeebodem.



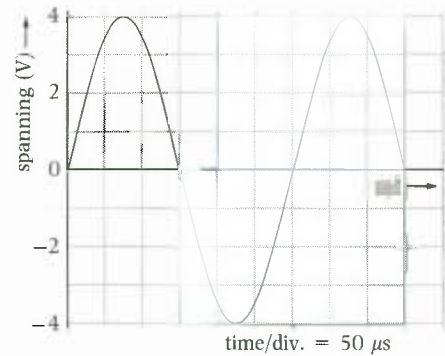
5 Een geluidstrilling wordt veroorzaakt door een elektrisch signaal. De veranderingen in de spanning V van dat signaal zijn de oorzaak van de bergen en dalen die we op het scoopbeeld te zien krijgen. Op de oscilloscoop kunnen we het signaal met behulp van de knop 'V/div.' (volt per schaaldeel) zó aanpassen, dat de uitwijkingen goed op het beeldscherm te zien zijn.

In figuur 62 zie je een scoopbeeld van een geluidstrilling. De time/div.-knop staat op $50 \mu\text{s}$ ($1 \mu\text{s} = 0,000\,001 \text{ s}$). De V/div.-knop staat op 1 V.

- Hoe groot is de amplitude?
- Welk verschil is er tussen de uitwijkingen boven 0 V en beneden 0 V?
- Bepaal de trillingstijd van de trilling.
- Bereken de frequentie.

fig. 62

Scoopbeeld van een geluidstrilling.



6 Uit een luidspreker hoort men op hetzelfde moment het geluid van een bas en van een fluit. Hoewel er maar één luidspreker wordt gebruikt, hoor je toch duidelijk onderscheid tussen de bas en de fluit. De frequenties van beide instrumenten zijn zeer verschillend.

- Welk instrument brengt geluid voort met een lage frequentie?
- Schets in een u,t -diagram de geluidstrilling van de bas.
- Schets in hetzelfde u,t -diagram ook de geluidstrilling van de fluit. Laat daarbij duidelijk het verschil in frequentie zien tussen de fluit en de bas. De luidspreker krijgt beide signalen tegelijkertijd toegevoerd. De luidsprekerconus moet dan zowel een trilling van een lage als van een hoge frequentie voortbrengen.
- Bij b en c heb je de lage en hoge frequentie apart geschetst. Schets nu in een nieuw u,t -diagram de samengestelde geluidstrilling van de bas en de fluit.

