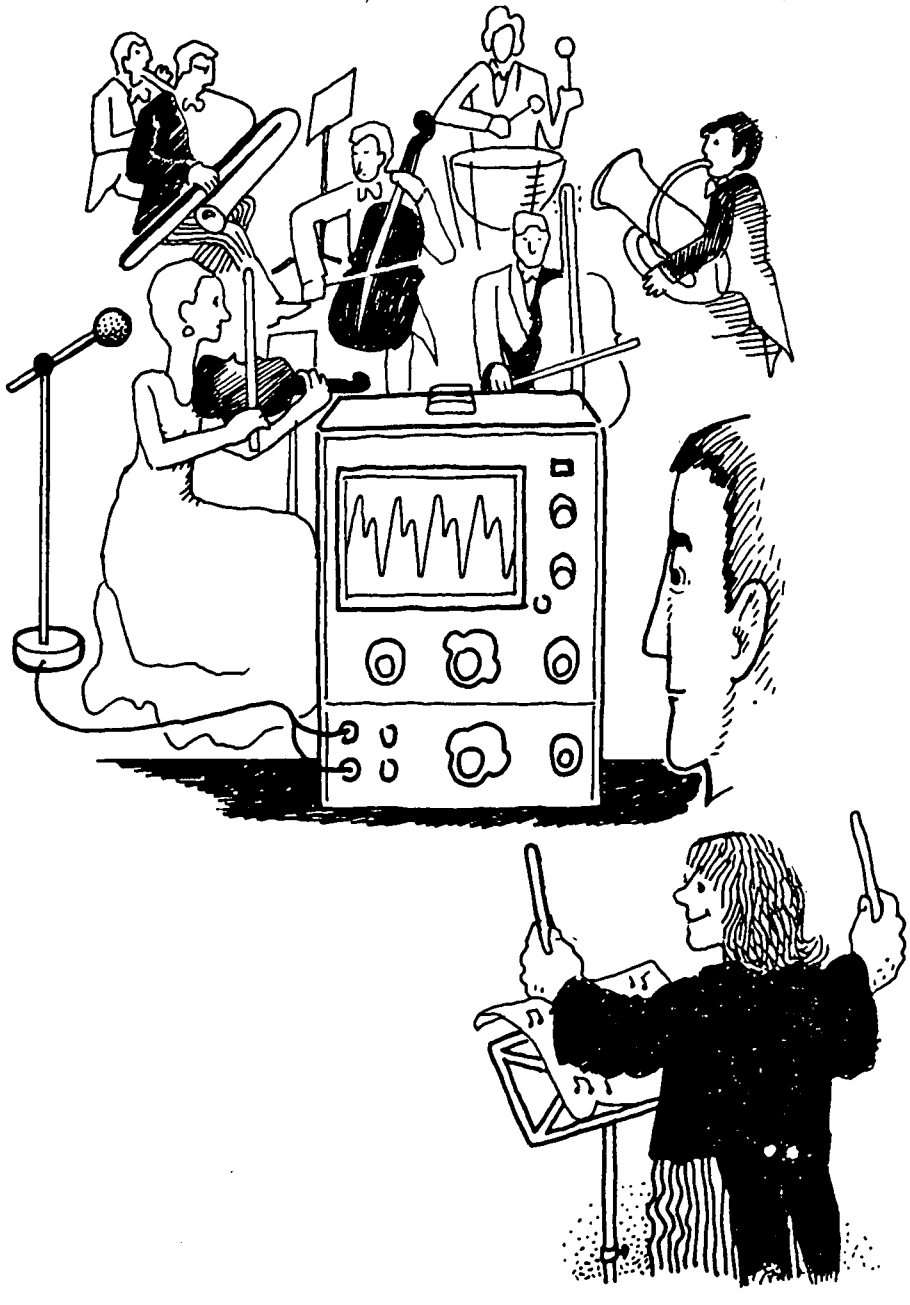
MUZIEK



vwo bovenbouw

natuurkunde projekt

PLON UvA RUG

VWO-BOVENBOUW NATUURKUNDE PROJEKT

Het vwo-bovenbouw curriculum in wording bestaat uit thema's, blokken en onderzoeksperiodes. In de thema's staat een themavraag uit de dagelijkse omgeving, de techniek, de samenleving of de wetenschap centraal.
In blokken worden belangrijke fysische onderwerpen in hun samenhang gegeneraliseerd.

OVERZICHT VAN HET EXPERIMENTELE CURRICULUM

4e klas	5e klas	6e klas
Lijfwerk	Sport	Ioniserende Straling
Muziek	Blok 5.1	Blok 6.1
Risico's in het verkeer	Motoren	Hoe ontwikkelt de wetenschap zich?
Blok 4.1	Blok 5.2	Open onderzoek
Het weer	Rond 1900	Blok 6.2: Repeteren voor het examen
Energie	Automatisering	
	Blok 5.3	
	Satellieten	
	Keuze-onderwerpen	

Experimenteel natuurkunde thema voor de 4e klas vwo.
Samengesteld door medewerkers van het vwo-bovenbouwprojekt en projektleraren.

© 1983 Rijksuniversiteit Utrecht, Universiteit van Amsterdam, Rijksuniversiteit Groningen.
PLON, Lab. voor Vaste Stof, Postbus 80.008, 3508 TA Utrecht,
Didaktiek Natuurkunde UvA, Nieuwe Achtergracht 170, 1018 WV Amsterdam,
Didaktiek Natuurkunde RUG, Landleven 12, 9747 AD Groningen.

INHOUD

Muziek 3
1. Wat ga je tijdens dit thema doen? 3
2. Een indeling van de lessen 4
3. Muziek in de tijd 5
4. Muziek beoordelen 6

1 Tijdaspekten 8
1.1 Maat 8
1.2 Tempo 8
1.3 Ritme 10
1.4 Melodie 12
1.5 Dynamiek 14

2 Toonaspekten 16
2.1 Geluidbronnen 16
2.2 Toonhoogte 16
2.3 Oktaven 18
2.4 Samenklank 20

3 Geluid in lucht 22
3.1 Drukvariaties 22
3.2 Golflengte en voortplantingssnelheid 24

4 Geluidssterkte 28
4.1 Hoe luid? 28
4.2 Geluidssterkte en luidheid 30

5 Richting horen 34

6 Geluid binnen en buiten 38
6.1 Kwadratenwet 38
6.2 Terugkaatsing 40
6.3 Interferentie 42
6.4 Nagalm en echo 42
6.5 Resonantie 44

7 Klankkleur en het oor 46
7.1 Klankkleur 46
7.2 Hoe zit het oor in elkaar? 48
7.3 Sinusvormige en complexe tonen 50
7.4 Een toon en zijn componenten 54
7.5 Klankkleur en (afwezige) componenten 54

8 Muziekinstrumenten 56
8.1 Inleiding 56
8.2 De open luchtkolom 56
8.3 Half open luchtkolom 60
8.4 De konische buis 60
8.5 De afgeknotte konische buis 60
8.6 De klankkleur van een blaasinstrument 62
8.7 Resonantie in een snaar 64
8.8 Verschillende tonen maken 66
8.9 Het stemmen van een snaar 68
8.10 De toonaanzet 68

9 Elektrische bewerkingen van muziek 72
9.1 Inleiding 72
9.2 Ruis 73
9.3 Vervorming 76
9.4 Hoe ontstaat vervorming? 76

INHOUD

Keuzeonderzoeken 80

10 Muziekinstrumenten 80

11 Geluidsinstallaties 82
11.1 Stereo 82
11.2 HI-FI ..... de DIN-norm 82
11.3 De platenspeler 83
11.4 Het element 84
11.5 De cassetterecorder 86

12 Frequentie en toonhoogte 88

Bijlagen

1 Oscilloskoop
2 Toongenerator
3 Geluidssterkte meten

1. Wat ga je tijdens dit thema doen?

Dit thema gaat over de fysische aspekten van muziek. Muziek is een complex van harde en zachte, snelle en langzame, hoge en lage tonen en samenklanken van tonen. Muziek is er om van te genieten, zowel bij het maken als bij het ernaar luisteren. Hoewel we natuurlijk hopen dat je van dit thema zult genieten, gaat het er toch in de eerste plaats om, dat je tijdens dit thema bezig bent met het ontdekken van de fysische aspekten van muziek, met theorieën en meetmethoden.
Heel kort gezegd heeft dit thema drie doelen: je komt meer van de fysische aspekten te weten, waardoor je beter van muziek kunt genieten en je bijv. beter met je apparatuur kunt omgaan, omdat je je instrument beter begrijpt, omdat je beter snapt hoe muziek in elkaar zit. Daarnaast leer je een aantal begrippen kennen die niet alleen voor muziek maar ook voor andere stukken van de natuurkunde van belang zijn zoals frekwentie, interferentie, harmonische veranderingen. Maar vooral leer je hoe je verschillende aspekten aan een zo complex verschijnsel als muziek kunt onderscheiden en meetbaar kunt maken.

Daarom hebben we (op enkele uitzonderingen na) op de linker bladzijde de theorie gezet en op de rechter bladzijde de opdrachten, waarmee je de muziek "te lijf" kunt gaan.

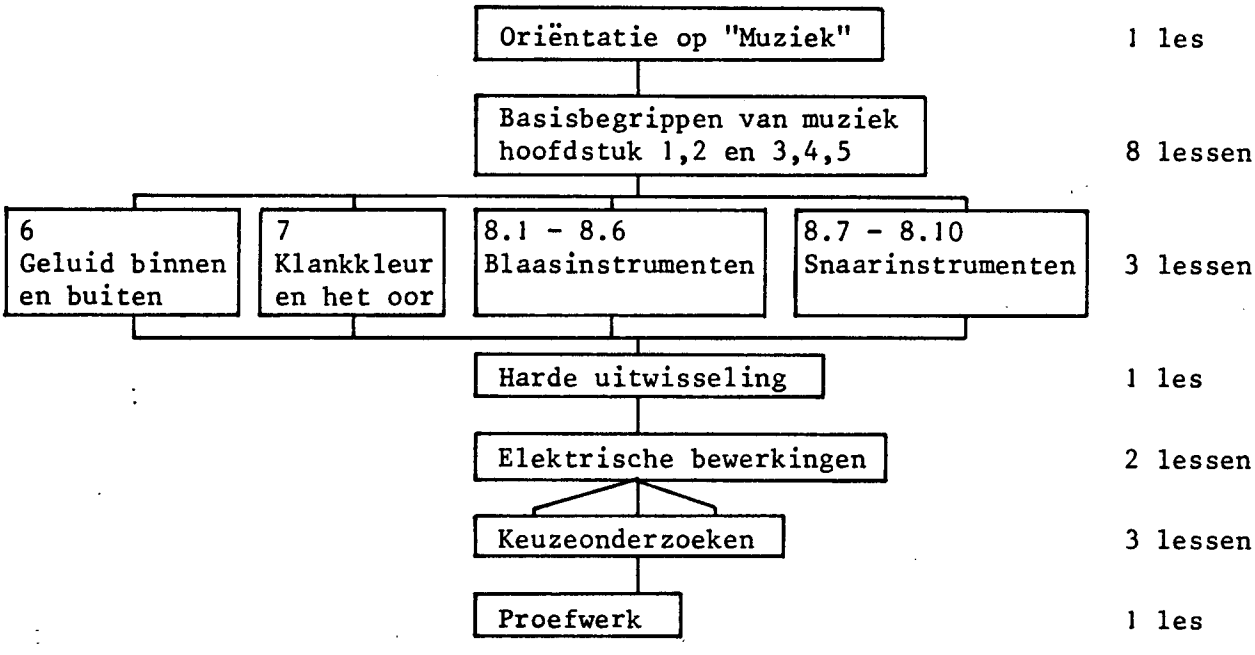
Het is de bedoeling dat je gebruik maakt van wat je in "Lijfwerk" geleerd hebt: aan elkaar uitleggen wat je geleerd hebt. Dat zal niet in de vorm van een demonstratieles gebeuren, maar in de vormen van kleine rapportages aan je groep, als jij één bijzonder ding voor je groep hebt uitgezocht, of als wat grotere rapportages aan de klas als je een hoofdstuk wat uitgebreider hebt bekeken en gedaan dan de andere groepen in de klas. Probeer steeds duidelijk te zijn in de hoofdpunten, die de anderen zeker moeten weten na hun rapportage. De beste methode (ook voor jezelf!) is om vragen te maken, die de anderen kunnen maken.

fig. 1
Eén aspekt van "Muziek": het "geluidsbeeld".

De keuzeonderzoeken aan het eind van het thema zijn echt bedoeld om je eigen interesse in een deel van muziek uit te werken. Jouw onderzoek rapporteer je schriftelijk of mondeling. Daarbij moet je niet zo zeer de nadruk leggen op nieuwe feiten die je geleerd hebt als wel op de *methode* die je gevolgd hebt om achter die feiten te komen.

2. Een indeling van de lessen

Het lessenschema ziet er in grote lijnen uit zoals in onderstaand schema staat weergegeven.



Totaal zijn er dus ca. 20 lessen nodig. Besteed je lessen goed! En probeer aan het eind van elke les voor jezelf op te schrijven wat je geleerd hebt, praat er dan over hoe dat komt met je groep of met je leraar.

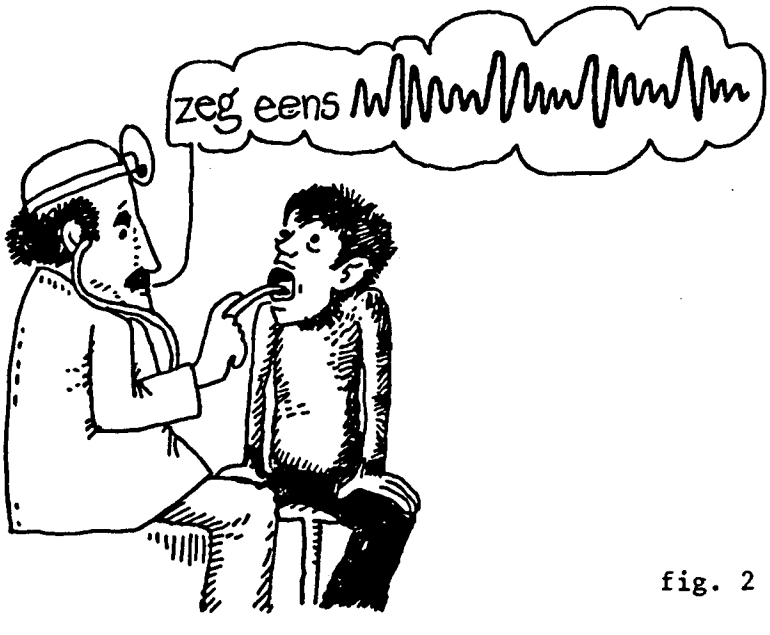


fig. 2

3. Muziek in de tijd

Muziek heeft sinds mensenheugenis over de hele wereld bestaan. Veel muziek die ooit gemaakt is zullen we nooit meer kunnen horen, omdat hij niet afdoende werd vastgelegd. Maar door afbeeldingen, geschriften of overlevering hebben we vaak toch wel enig idee van die muziek en de gebruikte instrumenten.
Altijd en overal weerspiegelt muziek de kultuur waarin hij wordt beoefend. In alle oude kulturen werd de oorsprong van muziek bij goden gezocht. Toch stond de muziek door de verwevenheid van de religie met het dagelijks leven vaak dicht bij de mensen.

fig. 3 *Oude Egyptische schilderingen, welke vele duizenden jaren oud zijn en muzikale voorstellingen dragen.*

In West Europa ging de verbreiding van het christendom gepaard met het ontstaan van een aparte "geestelijke" muziek. In kloosters en kerken was sprake van systematische muziekbeoefening.
In de vroege middeleeuwen kwam de "wereldlijke" muziek slechts langzaam tot ontwikkeling. Deze muziek werd door rondreizende minnezang in stand gehouden en verder verspreid. Later, met de opkomst van de steden en van de handeldrijvende burgerij, werden de kunsten en dus ook de muziekbeoefening bevorderd en werd de muziek gekultiveerder en geraffineerder. Zo deed bijvoorbeeld de meerstemmigheid op grote schaal zijn intrede. Gaandeweg ontstond het klimaat voor wat wij nu "grote komponisten" noemen. Ook in hun tijd was de muziek niet zo wijd verspreid als nu. Want in vroeger tijden was muziek altijd "live". Dat betekent dat om veel aan muziek te doen je vaak naar één of enkele muzikanten moest luisteren of ook zelf muziek moest maken. Grote orkesten konden slechts door zeer rijke vorsten betaald worden. Daarom konden die bijna door niemand beluisterd worden. Vaak ook door de komponisten niet. Dat zorgde ervoor dat de voor deze orkesten bestemde muziek elitair was. Dat is pas in deze eeuw van massa-kommunikatie aan het verminderen. Iets anders is dat door deze kommunikatie (opname- en weergavetechniek!) ook verschillende soorten muziek elkaar veel gemakkelijker beïnvloeden. Let maar eens op de moderne muziek.

Muziek bestaat er in talloze soorten en stijlen, en kan allerlei funkties hebben. Bij de oude Grieken was "muziek" iets dat te maken had met dans, spel, zang en dichtkunst. In onze samenleving kan muziek bijvoorbeeld ook als ondersteuning dienen bij show of film, of als "achtergrond" bij andere bezigheden gebruikt worden. Soms staat de muziek dus op zichzelf, maar meestal heeft hij te maken met andere dingen er omheen. In alle gevallen kun je zeggen dat muziek emoties weergeeft en teweegbrengt.

4. Muziek beoordelen

Omdat menselijke emoties persoonsgebonden zijn en afhankelijk van omstandigheden, is het in veel opzichten moeilijk een oordeel over de kwaliteit van muziek te geven. Wanneer is muziek mooi of geschikt voor een bepaald doel? Muziek uit een ver land kan je een gevoel van onwennigheid geven. Muziek kan soms heel slecht passen bij je stemming op een bepaald ogenblik. Muziek kan heel intiem zijn, maar ook een massale gebeurtenis betekenen. Bekende muziek kan je een prettig vertrouwd gevoel geven. Maar ook andere dingen dan emoties spelen een rol. Soms wordt muziek die je eigenlijk wel mooi zou vinden bedorven omdat hij slecht gespeeld wordt, bijvoorbeeld vals of te snel. Of de muziek klinkt niet mooi omdat hij uit een inferieur apparaat komt, of in een ongeschikte ruimte gespeeld wordt.

fig. 4 het geluid van een orgel is zeer geschikt voor grote ruimten zoals een kerk.

Kortom, allerlei faktoren beïnvloeden je waardering voor bepaalde muziek op een bepaald moment.

Muziek wordt door iemand bedacht of valt iemand in, wordt ten gehore gebracht, door iemand beluisterd en misschien onthouden. Muziek speelt zich dus in mensen af, maar treedt ook naar buiten.
Met onze stem en met instrumenten vinden we een weg voor de muziek naar het oor van anderen. Op de weg van mens(en) en muziekinstrument(en) direkt

naar andere mens(en) heeft muziek de vorm van (voordurende wisselingen in) geluid. Als de muziek bovendien nog via audio-apparatuur (mikrofoons, versterkers, banden, platen, radio, afspeelapparatuur en zo voorts) gaat, neemt het ook allerlei andere vormen aan: spanningsvariaties, groeven in een plaat, veranderingen in radiogolven en dergelijke. Uiteindelijk is het de bedoeling dat de muziek de luisteraar bereikt en dan emoties losmaakt. Door alle vormen en omzettingen onderweg zal de muziek wèl beinvloed worden, deels gewenst (bijv. door de akoustiek van een ruimte via allerlei elektronische effekten), deels ongewenst (bijv. ruis, vervorming). Hoe dichter de muziek die luisteraars bereikt, bij de door de muzikant(en) gewenste muziek komt, des te beter is de *kwaliteit* van de muziek.
Om de "vorm" van muziek te beschrijven kan je allerlei termen gebruiken: hard/zacht, hoog/laag, regelmatig/onregelmatig, scherp/dof, langzaam/vlug, simpel/ingewikkeld en dergelijke. Door op een natuurkundige manier naar muziek te kijken wordt je geholpen onderscheid te maken tussen aspekten van muziek die min of meer kontroleerbaar en meetbaar zijn, en andere waarvoor meer emotionele normen (mooi/lelijk, sfeervol enz.) op te stellen zijn.

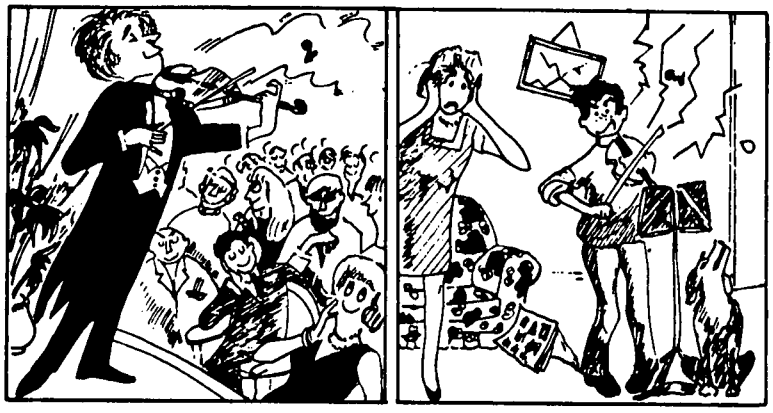


fig. 5

In dit *natuurkundige* thema kiezen we ervoor om enkele "kontroleerbare" zaken zodanig onder de loep te nemen dat je ze bij het beoordelen van muziek wat bewuster kunt laten meetellen of juist uitsluiten. Hierdoor zal je beoordeling genuanceerder kunnen uitvallen en ben je soms ook in staat gemotiveerde keuzen te maken bij het gebruik van instrumenten, audio-apparatuur, muziekstukken.

1 TIJD-ASPEKTEN

1.1 MAAT

Muziek neemt tijd in beslag. Als we ons met de tijdsaspekten van muziek willen bezighouden, kunnen we ons afvragen hoe lang een stukje muziek duurt. Dat zegt echter niet veel over die muziek. Belangrijker is wat er in een muziekstuk gebeurt.
Als je danst op muziek, beweeg je "vanzelf" gelijk op met de muziek. Je hoort kennelijk een soort regelmaat in die muziek, die jouw bewegingen bepaalt. Die regelmaat noemen we "puls". De puls kun je aangeven door met de muziek mee te tellen. Je telt dan elke puls een tel. Als je dat doet, merk je al gauw, dat de pulsen in de meeste muziek in groepjes komen. Groepjes van drie of vier pulsen zijn in onze muziek zeer gebruikelijk. Bij een wals bijvoorbeeld gaat het meetellen als volgt: één, twee, drie, één, twee, drie, één, enzovoort. De pulsen komen in groepjes van drie. Bij rockmuziek kun je tellen één, twee, drie, vier, één, enzovoort. De pulsen komen hier in groepjes van vier. Deze groepjes worden in de muziek maten genoemd, en wel respektievelijk een driedelige en een vierdelige maat.
Omdat muziek geen exakte wetenschap is en jouw oor geen meetinstrument, hangt het van jou af hoeveel pulsen je er maat waarneemt. Laten we als voorbeeld een muziekstuk nemen waarin niet alle pulsen even sterk zijn: EEN, twee, DRIE, vier, EEN, enz. of met streepjes genoteerd:

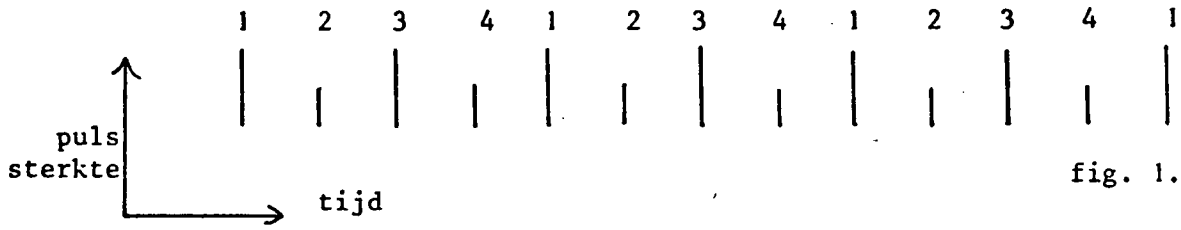


fig. 1.1

Dan kan het voorkomen dat je dat hoort als:

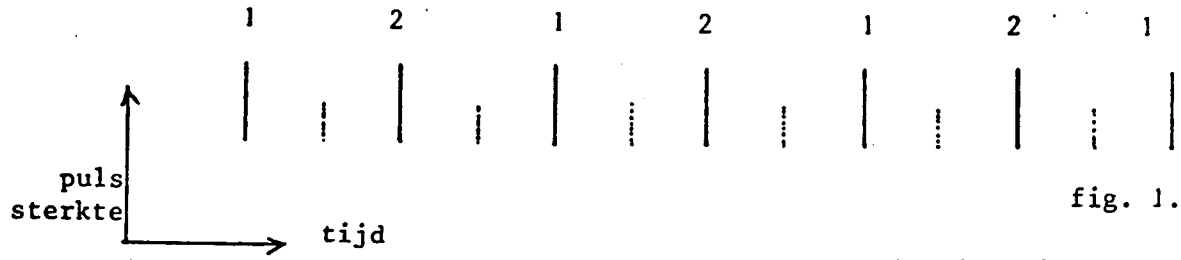


fig. 1.2

Dan tel je: Ene, tweeje, ene, tweeje, enz. En dan hoor je niet vier, maar twee pulsen per maat.
Het hangt ook van andere aspekten van de muziek (akkoorden, instrumentatie) af wat je hoort. En van jouw luister-ervaring en -vaardigheid natuurlijk. Je kunt dat oefenen met opdrachten 1.1 en 1.2.

1.2 TEMPO

Zoals je weet kunnen we snelle en langzame muziek onderscheiden. Met het begrip puls kunnen we dat onderscheid nu onder woorden brengen: snelle muziek is muziek waarin de pulsen snel opeenvolgen. In langzame muziek volgen de pulsen elkaar langzaam op. Dat wil niet zeggen dat ook de tonen elkaar langzaam opvolgen. Er kunnen zeer "snelle" passages voorkomen in "langzame" muziek. Je oor hoort alleen al die snelle tonen als behorend bij één langzame puls.

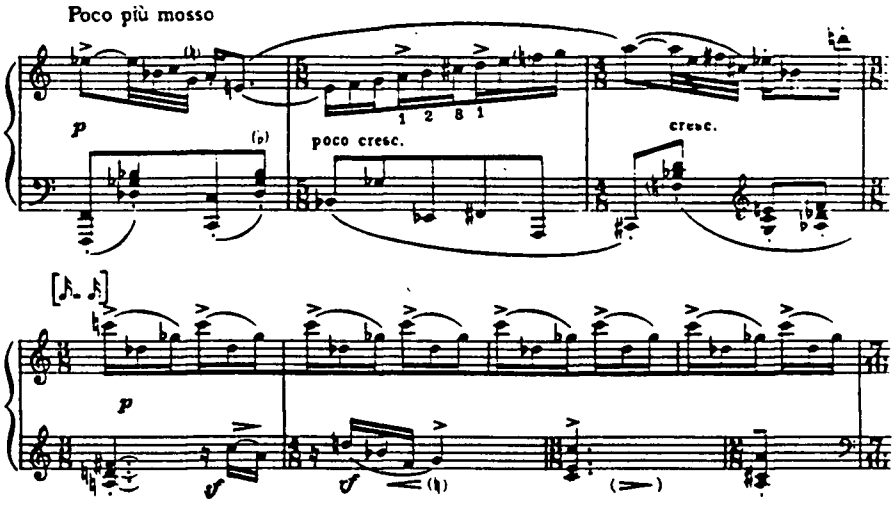


fig. 1.3
Een stukje muziek van Willem Pijper. De maat staat aangegeven: $\frac{3}{8}$; $\frac{4}{8}$ enz. In dit ene stukje staan dus steeds andere maten.

Pulsen bepalen

Opdracht 1.1: Op een cassettebandje staan 6 muziekfragmenten. Luister ernaar en geef bij elk fragment aan hoeveel pulsen er in een maat gaan. Doe dit door zachtjes mee te tellen.

Pulsen tellen

Opdracht 1.2: Je krijgt nog 6 fragmentjes te horen, er zitten nu ook fragmenten bij met 5, 6 en 7 pulsen per maat. Welke zijn dat? (Geef weer van alle fragmenten het aantal pulsen per maat aan.)

Zijn er na afloop verschillen met anderen? Probeer na te gaan wie er gelijk heeft.

fig. 1.4

Dansende paren. Dansen maken voornamelijk gebruik van 3-kwart en 4-kwart maat.

TIJD-ASPEKTEN

De snelheid waarmee de pulsen elkaar opvolgen noemen we in de muziek tempo (meervoud tempi, want het is een italiaans woord). Ook de tempi zelf worden in de klassieke muziek met italiaanse termen aangegeven.
Zeer gangbaar zijn: Largo - breed, zeer langzaam
Adagio - langzaam
Andante - gaande, matig langzaam
Moderato - gematigd snel
Allegro - snel
Presto - zeer snel

Nu je het begrip puls wat beter hebt leren kennen zou je kunnen denken dat alle muziek in maten of minstens in pulsen zou kunnen worden verdeeld. Dat is echter niet waar. Ken je zelf voorbeelden van muziek waarin je geen duidelijke maatindeling kan ontdekken?
Je hoort een voorbeeld uit een pianostuk van Debussy (ca. 1910). Je kunt hier nog wel een (zwakke) puls waarnemen, maar geen duidelijke maatindeling. De muziek krijgt daardoor een eigenaardig zwevend karakter.
Ook muziek zonder duidelijke puls komt voor. Je hoort twee voorbeelden uit dezelfde tijd (±1970), het ene uit de pop-wereld (Yes), het andere uit de moderne muziek (Ligeti).
Als muziek zich naar spraak richt is er evenmin een duidelijke puls (Gregoriaans).

1.3 RITME

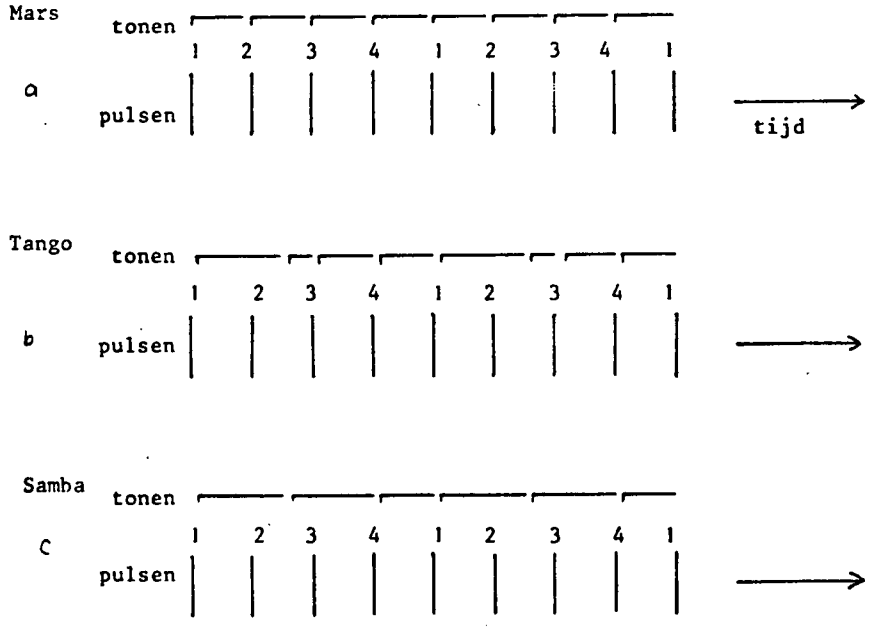


fig. 1.5

We hebben alleen nog maar over pulsen en maten gesproken. Er is meer aan de hand met de tijdsaspekten van muziek. Laten we bijvoorbeeld eens drie soorten muziek bekijken: de mars, de tango en de samba. Alle drie de soorten hebben vier pulsen in de maat, en ze hebben ongeveer hetzelfde tempo. Toch is er een groot verschil tussen deze soorten. Waar zit dat in?
Laten we de manier, waarop tonen of bij elkaar horende groepen van tonen over de pulsen zijn verdeeld, bekijken.

HENRY PURCELL (1659-1695)
Ten Sonatas in Four Parts
Dix sonates à quatre
Zehn Sonaten zu vier Stimmen

Side 1 · Face 1 · Seite 1 (30:52)
1. **Sonata No.1 in B minor · si mineur · h-moll** (5:08)
   Adagio — Canzona (Allegro) — Largo — Vivace — Grave
2. **Sonata No.2 in E flat major · mi bémol majeur · Es-dur** (6:10)
   Adagio — Canzona (Allegro) — Adagio — Largo — Allegro
3. **Sonata No.3 in A minor · la mineur · a-moll** (6:11)
   Grave — Largo — Adagio — Canzona — Gigue — Grave
4. **Sonata No.4 in D minor · ré mineur · d-moll** (6:39)
   Adagio — Canzona — Adagio — Vivace — Largo
5. **Sonata No.5 in G minor · sol mineur · g-moll** (6:44)
   [Adagio] — Canzona — Largo — Adagio — Presto — Allegro — Adagio

fig. 1.6

Tempo

Opdracht 1.3: Bepaal (met een stopwatch, of met een secondenwijzer op je horloge) hoeveel pulsen per minuut in de stukjes largo, adagio etc. van het cassettebandje voorkomen. Controleer het eventueel met een metronoom.

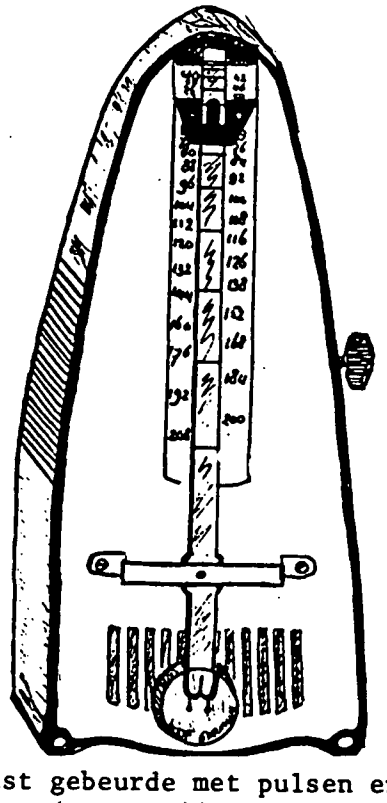


fig. 1.6 Met een metronoom kun je regelmatig tikken laten horen. Het aantal tikken per minuut is instelbaar.

Ritme

Opdracht 1.4 a) Noteer, zoals dat in de tekst gebeurde met pulsen en tonen het ritme van drie dansvormen (zet erbij welke).

b) Doe thuis hetzelfde met een stukje van je favoriete nummers. Vergelijk de resultaten onderling. Wat is de oorzaak van eventuele verschillen bij dezelfde dansvormen?

c) Je hoort op het cassettebandje een drummer, die in één tempo verschillende ritmes speelt. Welke ritmes zijn dat?

Bij een mars volgen de tonen precies het pulsenpatroon. Vandaar het hoekige karakter van veel marsen. Heel geschikt om op te lopen. Bij tango en samba volgen de tonen het patroon vrijer. Daardoor krijgen deze dansen een swingender karakter.
We zeggen dat deze voorbeelden verschillen, omdat ze een ander ritme hebben.
Dansen herkennen we aan hun ritme. Zo spreken we over walsen, menuetten en sarabandes in oude muziek, ook als er niet bij gedanst wordt, en over bee-bop, reggae en disco in popmuziek.
In dansmuziek wordt, omdat er op gedanst moet worden, één ritme gedurende het hele stuk volgehouden.

1.4 MELODIE

Iedereen weet zo ongeveer wel wat er met een melodie bedoeld wordt: een samenhangende reeks tonen, na elkaar. De samenhang bestaat uit het ritme waarin de tonen elkaar opvolgen, maar ook uit de toonreeks de tonen waaruit de melodie bestaat, in volgorde van toonhoogte.
Een voorraad tonen waaruit een melodie bestaat, gesorteerd op toonhoogte, noemen we een *toonreeks*. Met tonen van dezelfde toonreeks kun je allerlei verschillende melodieën maken.
Verschillen in tempo, ritme, melodieën, het maken van samenklanken, kortom het componeren en spelen van muziek vormt het onderwerp van de muziekleer.
In dit natuurkundige thema zullen we nu verder ingaan op de aard van *tonen*, het *ontstaan* van tonen, het *overbrengen* en het *horen* van tonen. Met natuurkundige kennis kan je die dingen beter begrijpen en misschien ook beter muziek maken of ervan genieten.

fig. 1.7 (uit: de Volkskrant, april 1983)

Toonreeksverschillen

Opdracht 1.5: Je hoort nu drie melodieën op een cassettebandje. Ze worden elk twee maal achter elkaar gespeeld. Maar de tweede keer is telkens één toon vervangen door een toon, die niet tot de oorspronkelijke toonreeks behoort. Geef aan welke toon dat was. (De hoeveelste toon in de melodie.)

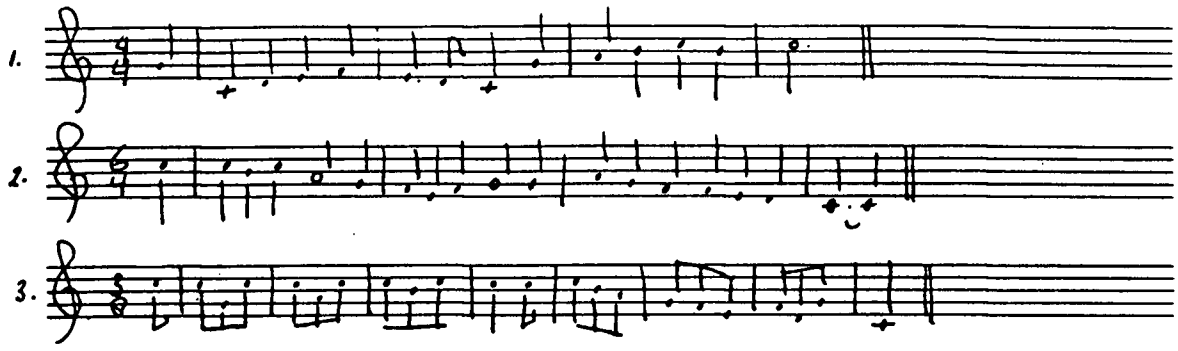


fig. 1.8 De drie melodieën van opdracht 1.5 in notenschrift.

1.5 DYNAMIEK

Naast melodie, harmonie, ritme en tempo is ook van belang hoe hard (of zacht) bepaalde tonen, passages of zelfs hele stukken muziek klinken. Ga maar na: slaapliedjes moeten liefst heel zacht, terwijl popmuziek pas "lekker" klinkt, als het goed hard staat.
We hebben het dan in feite wel over een soort gemiddeld geluidsniveau over een heel muziekstuk. Dit gemiddelde geluidsniveau bepaalt onder andere of muziek gebruikt kan worden voor achtergrondmuziek, luistermuziek, dansmuziek. Voor het meten van geluisniveau gebruik je de dB-meter. Die bestaat uit een mikrofoon, een versterkertje en een voltmeter die geijkt is (meteen in dB). De handleiding van de dB-meter is als bijlage 3 op blz. opgenomen.
De eenheid waarin de geluidssterkte wordt uitgedrukt is de decibel (dB), genoemd naar de man die de telefoon heeft uitgevonden. De dB is zo gekozen, dat de meeste geluiden uit ons dagelijks leven ongeveer tussen de 0 decibel (dB) en de 100 decibel (dB) liggen. Hoe de decibel precies gedefinieerd wordt kom je op blz. 28 te weten.
0 dB komt dan overeen met de geluidssterkte, die in "absolute" stilte nog net (niet) kan worden waargenomen.
Dat de gemiddelde geluidsniveaus bij muziek zo sterk uiteenlopen is voor een groot deel te danken aan elektrische versterking.
Willen we wat afweten van de normale geluidssterkte dan moeten we terug naar de "gewone" muziekinstrumenten.
Beluisteren we één muziekinstrument apart, dan blijken sommige tonen of stukjes harder of zachter gespeeld te worden dan andere. Ook wanneer instrumenten samen spelen wordt muziek vaak verlevendigd door verschillen in hard en zacht. We noemen dit verschil in hard en zacht de *dynamiek* van de muziek.
Hoe groter de verschillen in geluidssterkte hoe groter de dynamiek. Een goede maat voor dynamiek van een muziekstuk is het verschil in dB tussen de hardste en de zachtste passage. Net als het gemiddeld geluidsniveau is de dynamiek van muziek van invloed op voor welke situatie die muziek het meest geschikt is. Voor een slaapliedje is het belangrijk dat èn de gemiddelde geluidssterkte èn de dynamiek niet te groot zijn.
Voor luistermuziek is het vaak belangrijk met grote verschillen in geluidssterkte de aandacht van de luisteraars gevangen te houden.
Kijken we naar de instrumenten zelf, dan blijken er grote verschillen in dynamiek te bestaan, clavecimbels bijvoorbeeld kunnen slechts op één geluidssterkte tonen voortbrengen (ga na hoe deze werken), terwijl op de piano zeer zacht maar ook zeer hard gespeeld kan worden. In de muzieknotatie wordt vaak weergegeven hoe hard bepaalde noten of een passage gespeeld moeten worden. Een zeer zacht stukje wordt voorzien van de letters *pp*, hetgeen betekent pianissimo (zeer zacht), daarna krijgen we *p* piano (zacht), *mp* mezzopiano (matig zacht), *mf* mezzoforte (matig hard), *f* forte (hard) en *ff* fortissimo (zeer hard).
Bij veel muzieksoorten zijn de verschillen in geluidssterkte veel kleiner dan de verschillen waar de instrumenten afzonderlijk toe in staat zijn, met andere woorden: de dynamiek die van een instrument in een muziekstuk geëist wordt is veel kleiner dan de dynamiek waartoe het instrument in staat is.

Geluidssterkte meten

Opdracht 1.6: Bij het meten van geluidssterkte treden verscheidene problemen op. In deze proef ontdek je welke.
Meet de geluidssterkte bij een zacht spelende radio, een pop-concert, een "stille" klas. Maak zo mogelijk van te voren een schatting (na enkele metingen gedaan te hebben kan je dat best). Beschrijf welke problemen je bent tegengekomen en welke oplossingen je daarvoor gevonden hebt.

Dynamiek van een muziekstuk bepalen

Opdracht 1.7: Beluister diverse stukjes muziek (zo mogelijk "life"), schat in dB's de dynamiekverschillen per nummer (neem o.a. ook wat klassieke muziek). Probeer ze daarna op te meten met de dB-meter.

Het dynamiek-bereik

Opdracht 1.8: Bepaal van een aantal instrumenten de geluidssterkte van de zachtste en de hardste tonen, die erop mogelijk zijn. Let op de afstand tot de dB-meter. Wat zou men verstaan onder het dynamiek-bereik van een instrument? Indien mogelijk, vraag dan of verschillende mensen, die één instrument bespelen, willen laten horen hoe hard, zacht pp, p, f, ff is. Vergelijk dit met elkaar.

Opdracht 1.9: Zoek uit hoe groot het verschil in geluidssterkte is wanneer op twee blokfluiten even hard wordt gespeeld in plaats van op één.

2 TOONASPEKTEN

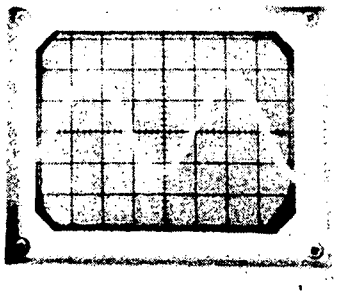
2.1 GELUIDBRONNEN

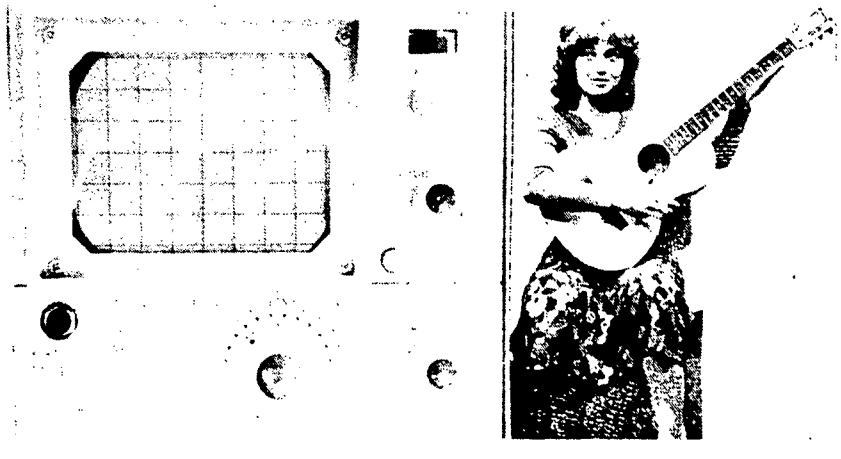
Geluidbronnen zijn voorwerpen, apparaten, die geluid maken. Muziekinstrumenten, bijv.: snaren, orgelpijpen, drums enz. Of een luidspreker.
Stemvorken, stembanden, snaren, luidsprekers en andere voorwerpen die geluid produceren *trillen*.
Kenmerkend voor het geluid dat je hoort, zijn onder andere de *toonhoogte* en het *geluidsniveau*. De toonhoogte hangt af van het aantal trillingen, dat de geluidbron per seconde uitvoert: hoe meer trillingen per seconde, hoe hoger de toon.
Het geluidsniveau (de "geluidssterkte") hangt af van de uitwijking van het trillende deel van de geluidbron: hoe hoger de uitwijking (amplitude), hoe hoger het geluidsniveau.

2.2 TOONHOOGTE

Je kunt heel veel verschillende tonen horen. Om de verschillen tussen tonen te onderzoeken is het heel handig om tonen zichtbaar te maken. Dat kan op een oscilloskoop, meestal eenvoudig skoop genoemd. In bijlage 1 op blz. staat een handleiding hoe je met een skoop om kunt gaan.
Hieronder staan enkele foto's van een oscilloskoop - beeld met een toon er op. Je ziet dat elke toon een zich herhalend patroon geeft. De herhalingstijd van zo'n patroon kan je met de hulp van de tijdbasis van de oscilloskoop en het beeld bepalen.
De frequentie van een patroon is het aantal malen dat het patroon zich per sekonde voordoet. Dat is dus het aantal malen dat de herhalingstijd in een sekonde past. Is de herhalingstijd van een geluid bijvoorbeeld 2 millisekonde dan is de frequentie 500 per sekonde. De eenheid "per sekonde" wordt gewoonlijk hertz (Hz) genoemd.

fig. 2.1
Oscilloskoopbeelden van een stemvork en een gitaar. In beide gevallen stond de tijdbasis op 0,5 ms/div.





Geluidbronnen trillen

Opdracht 2.1: Voel met je vingers aan je keel, terwijl je een geluid voortbrengt.
Sla een stemvork aan met een hamertje. Voel voorzichtig met je vingers aan de uiteinden van de stemvork.
Laat een toon klinken met een luidspreker, aangesloten op een toongenerator. (Voor een bedieningshandleiding van een toongenerator, zie bijlage 2.)
Voel voorzichtig aan de conus van de luidspreker.
Leg voorzichtig een licht voorwerp (bijv. een ping-pong-balletje of een moertje) op de luidsprekerconus en zet de toongenerator aan. Wat verandert er
- als je het geluid harder zet?
- bij een andere toonhoogte?

Een geluidspoor trekken

Opdracht 2.2: Sla met een hamertje een stemvork aan, waaraan een fijne stift is bevestigd. (Gebruik zo mogelijk een grote stemvork, die een lage toon produceert.)
Beweeg de fijne stift van de trillende stemvork over een carbonpapiertje of een beroete glasplaat.
Sla de stemvork harder aan en herhaal de proef. Welk verschil zie je met de eerste proef?
Neem een kleinere stemvork (die een duidelijk hogere toon produceert), en herhaal de proef (waarbij je de stemvork ongeveer even snel over de glasplaat beweegt als bij de eerste proef).
Welk verschil zie je met de eerste proef?

Geluidspatronen

Opdracht 2.3: Gebruik de volgende opstelling:

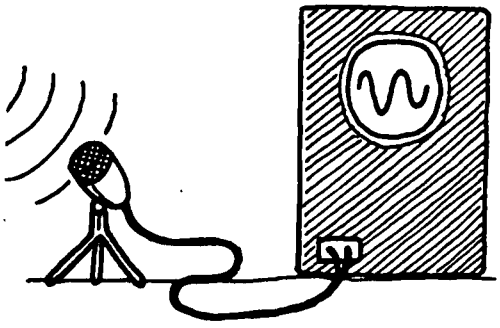


fig. 2.2

Raadpleeg eventueel de gebruiksaanwijzing van de skoop.
Onderzoek een aantal verschillende geluiden zoals:
- een FM-radio tussen de stations afgestemd
- koffiemolen of een ander apparaat
- de gezongen klinkers A, O, I, E, OE
- een blokfluit of een ander instrument
- een stemvork, het demonstratieinstrument

a) Schets de vorm van het patroon op de skoop
b) Bij welke geluiden hoor je tonen? (Als je niet weet of je een toon hoort, probeer dan of je de toon van het geluid na kunt zingen.)
c) Hoe zie je op de skoop dat het geluid een toon is?
d) Als je de toonhoogte groter maakt, wat gebeurt er met het patroon op de skoop? Wat gebeurt er als je de toonhoogte verlaagt?
e) Wat zie je als je de sterkte van het geluid verandert?
f) Hoe zie je het verschil tussen twee verschillend klinkende tonen met dezelfde toonhoogte?

zie vervolg blz. 19

De herhalingstijd noemen we de trillingstijd. Trillingstijd en frekwentie hangen samen volgens de formule:

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

fig. 2.4

In opdracht 2.4 kan je proberen een zo nauwkeurig mogelijke methode te ontwerpen om de frequentie en de trillingstijd te bepalen.

BEPALEN VAN DE FREKWENTIE VAN EEN SIGNAAL MET DE OSCILLOSKOOP

Als je een toongenerator aansluit op een oscilloskoop, krijg je op het oscilloskoopscherm een beeld van de uitwijking in het signaal in de loop van de tijd (vergelijkbaar met de "geluidsporen" uit aktiviteit 2). De horizontale as op het skoopscherm is de tijd-as, op de vertikale as staat de uitwijking. (Zie fig. 2.1 op blz. 16.)
Voor het bepalen van de frekwentie van het signaal moet je de schaalwaarde van de tijd-as op het skoopscherm weten. Die schaalwaarde hangt af van de instelling van de *time/cm*-knop op de skoop. Bij het beeld op het skoopscherm linksboven hoort een instelling *time/cm* = 1 ms (= 1.10^{-3} s). Een afstand van 1 cm horizontaal op het scherm komt dan overeen met een tijd van 1 ms. De "lengte" van de trilling op het scherm is bijv. 2 cm, zodat de trillingstijd 2.1 ms = 2 ms (= $2:10^{-3}$ s) bedraagt. De frekwentie van het signaal is dan te berekenen met:
$f = 1/T = 1/2.10^{-3} = 500$ Hz.
Hoe groot is de frekwentie van het signaal op het skoopscherm van fig. 2.1 op blz. 16?

2.3 OKTAVEN

Ons oor registreert niet alleen maar toonhoogte maar ook een verband tussen toonhoogten. Je weet wel dat de jongens meestal lager zingen dan de meisjes. Toch zingen ze "dezelfde" tonen. Het verschil tussen de meisjes en de jongensstemmen (en tussen dezelfde grepen op een sopraan- en een tenorblokfluit) is een toonsafstand die we het oktaaf noemen. Omdat het oktaaf in westerse muziek een belangrijke rol speelt, ga je dit in opdracht 2.4 verder onderzoeken. Daar zul je merken dat een toon een oktaaf hoger klinkt als de frekwentie verdubbeld wordt.
Een toonreeks van een eenvoudig liedje kan precies binnen één oktaaf vallen. We kunnen zo'n toonreeks ook in zijn geheel één of meer oktaven hoger of lager plaatsen. Zo krijg je een opeenvolging van steeds "dezelfde" toonreeks. Maar de muzikale mogelijkheden worden zo een stuk uitgebreider.

vervolg opdracht 2.3 g) Uit de voorgaande onderdelen moet je nu konklusies kunnen trekken.
Een geluid is een toon als...
De toonhoogte hangt af van...
De sterkte van de toon van...
Het verschil tussen twee even hoge, even sterke, maar verschillende tonen zit in...

Frekwentie bepalen

Opdracht 2.4: Maak met de toongenerator (zie bijlage 2 op blz.) en een luidspreker een toon met een willekeurige frekwentie. Bepaal de frekwentie en de trillingstijd. Gebruik de schaal van de toongenerator, een oscilloskoop en een frekwentiemeter. Met welke methode krijg je de nauwkeurigste resultaten?

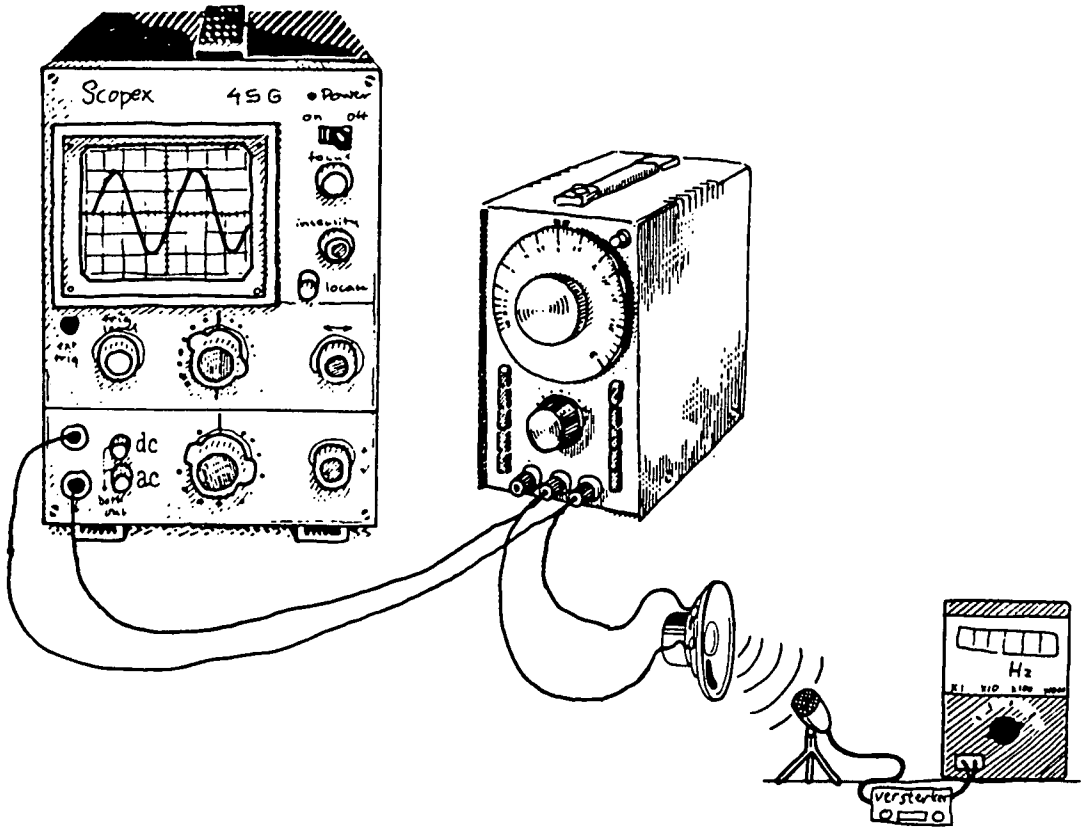


fig. 2.3

Oktaven

Opdracht 2.5: Stel op het gehoor een toongenerator met luidspreker af op de toon van een stemvork. Lees de frekwentie af ($f0$).

a. Verdubbel de frekwentie van de toongenerator ($2f0$). Beluister deze frekwentie samen met de stemvork.
b. Herhaal de frekwentieverdubbeling ($4f0$, $8f0$ enz.) en beluister de nieuwe tonen steeds samen met de toon van de stemvork.
c. Hoeveel oktaven omvat het gebied tussen 100 en 3200 Hz?

2.4 SAMENKLANK

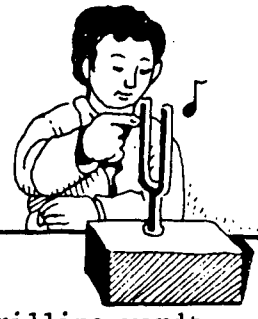
Tonen *na* elkaar vormen melodieën. We gaan nu eens kijken hoe het zit als je twee tonen *tegelijkertijd* te horen krijgt.
Twee tonen tegelijkertijd vormen samen een nieuwe klank, die we in het algemeen een tweeklank noemen. In zo'n tweeklank zijn de afzonderlijke tonen meer of minder gemakkelijk te herkennen. Nemen we het oktaaf als voorbeeld. Er ontstaat een homogene klank als twee toongeneratoren precies een geheel aantal oktaven verschillen van toonhoogte. In die klank zijn de afzonderlijke tonen niet goed meer te horen. We kunnen zeggen dat de twee op een afstand van een oktaaf goed versmelten. De klank is als het ware *glad* van karakter. Het tegendeel hiervan is de *ruigheid* van de samenklank van twee tonen die net geen oktaaf verschillen.
Twee tonen liggen goed in het gehoor als de verhouding tussen hun frekwenties eenvoudige getallen zijn, bijvoorbeeld 3:2 of 4:3. Bij ingewikkelder verhoudingen liggen de combinaties slechter in het gehoor. Als je daarover meer wilt weten en geïnteresseerd bent hoe dat samenhangt met de do-re-mi reeks, kan je dat onderzoeken in keuzeonderwerp 1.

Eén melodie in verschillende oktaven

Opdracht 2.6: Speel een bepaalde liefst zingbare melodie op een muziekinstrument (bijv. gitaar, piano, fluit). Probeer dezelfde melodie een oktaaf hoger te spelen. Is de melodie hetzelfde? Merk je het verschil als je meeneuriet?

Samenklank

Opdracht 2.7: Neem twee gelijkgestemde blokfluiten. Speel op blokfluit 1 één noot en op blokfluit 2 de andere noten, die binnen hetzelfde oktaaf als de noot van blokfluit 1 liggen. Welke combinaties klinken goed en welke klinken heel beroerd?



3 GELUID IN LUCHT

3.1 DRUKVARIATIES

Geluid ontstaat als lucht in trilling wordt gebracht, bijvoorbeeld door de conus van een speaker, de rand van een metalen bel, je stembanden of het rietje van een hobo.
Door het trillen wordt de lucht achtereenvolgens "uitgerekt" en "ingeduwd". Er ontstaan dus plaatselijk verhogingen en verlagingen van luchtdruk. Door de beweging van de luchtmolekulen worden de luchtdrukveranderingen doorgegeven en plant een geluids*golf* zich voort.
Je zou dat in onderstaand model kunnen weergeven.

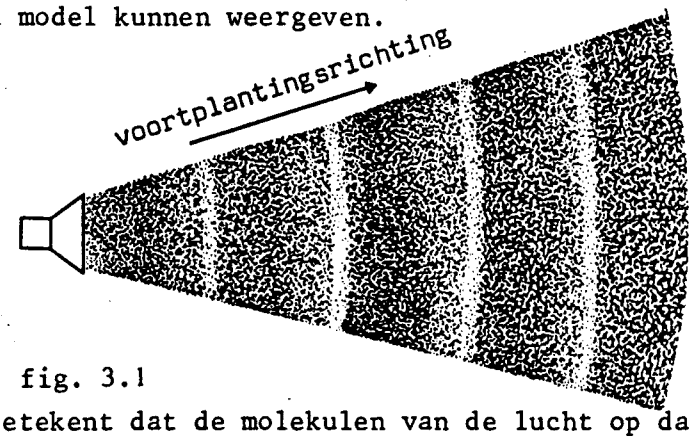


fig. 3.1

Veel puntjes bij elkaar betekent dat de molekulen van de lucht op dat moment dicht bij elkaar zitten (verdichting) en dat de luchtdruk dus hoger is dan de plaats waar minder puntjes staan (verdunning). Dit is een momentopname. Het patroon verschuift in de richting van de voortplantingssnelheid omdat er bij de luidspreker verdunningen en verdichtingen bijgemaakt worden. Je kunt een diagram maken van de luchtdruk verandering Δp en de afstand langs een lijn op een bepaald tijdstip t.
Laten we als voorbeeld het moment bekijken dat de luidspreker $1\frac{1}{2}$ trilling heeft uitgevoerd. Over elke trilling doe hij even lang, één *trillingstijd* T. Dus de luidspreker heeft $1\frac{1}{2}$ trillingstijd getrild, dus $t=1\frac{1}{2}T$. In die tijd zijn twee verdichtingen en één verdunning ontstaan. In het plaats $-\Delta p$-diagram zie je dat als twee "hobbels" en een "kuil".
Als $p=0$ dan is de druk de gewone luchtdruk p_o (ongeveer 1 atm.). Op andere plaatsen dan in de geluidsgolf waar de druk gewoon p_o is hebben we maar geen puntjes getekend....

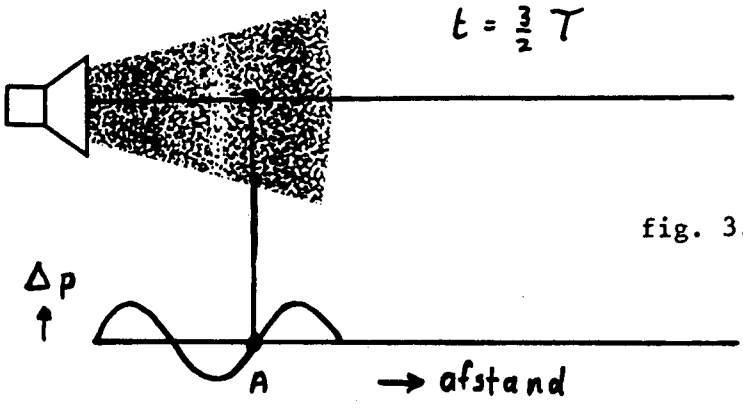
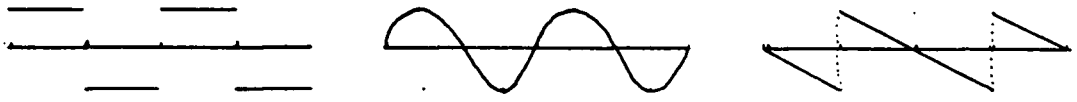


fig. 3.2

GELUID IN LUCHT - OPDRACHTEN

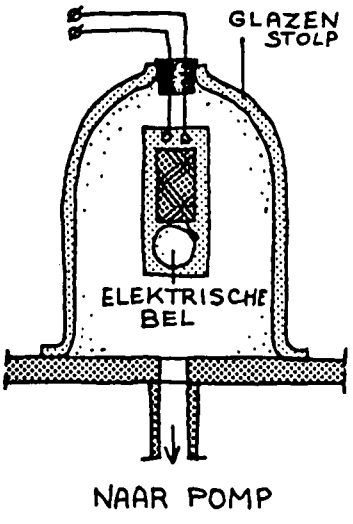
Opdracht 3.1: Sluit een speaker achtereenvolgens aan op de toongenerator die een blokvormige, een sinusvormige en een zaagtandvormige wisselspanning met een lage frequentie afgeeft.
Bekijk de beweging van de conus goed, voel er aan of belicht de conus stroboscopisch met ongeveer dezelfde frequentie als die de toongenerator voortbrengt.
Voer nu de frequentie op.
Bij welke frequentie kan je een toon horen?
Wat kan je zeggen over de vorm van de wisselspanning, de beweging van de conus en het geluid dat je hoort?

fig. 3.3



Opdracht 3.2: Zet een elektrische bel aan die onder een glazen stolp hangt.
Zuig met behulp van een vacuumpomp de lucht onder de stolp weg. Noteer je waarnemingen.

fig. 3.4



Opdracht 3.3: Een model voor het ontstaan en voortplanten van geluid kan gemaakt worden door gebruik te maken van een zogenaamde slinky. De proef lukt het best als de slinky vrij beweegbaar is opgehangen.
Beweeg een uiteinde in de lengterichting heen en weer.
De golfbeweging die nu ontstaat, moet bij het andere einde gedempt worden door bijvoorbeeld een handdoek over de slinky te hangen.
Welke onderdelen kunnen vergeleken worden met de geluidsbron en de lucht?
Wat zijn de verdichtingen en wat de verdunningen?

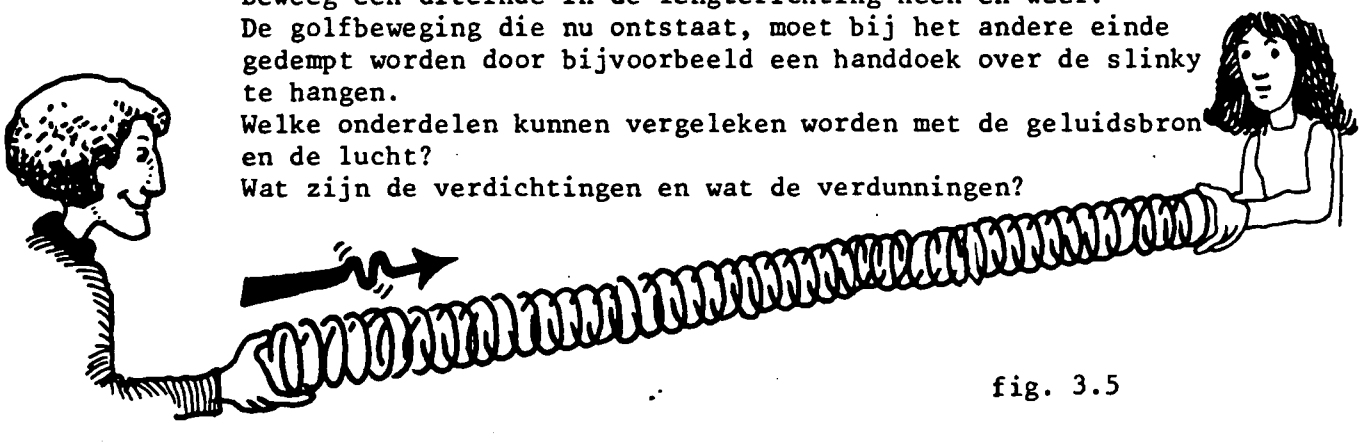


fig. 3.5

GELUID IN LUCHT

Uit de voorstelling op blz. 22 zie je dat op dit moment de druk ter plaatse van de conus gelijk is aan de luchtdruk p_o. De conus gaat de lucht "uitrekken" want na de verdichting, die net is ontstaan, moet een verdunning komen: de conus beweegt zich dus naar achteren. $\frac{1}{2}T$ later is de verdunning erbij gekomen en beweegt de conus zich naar voren.

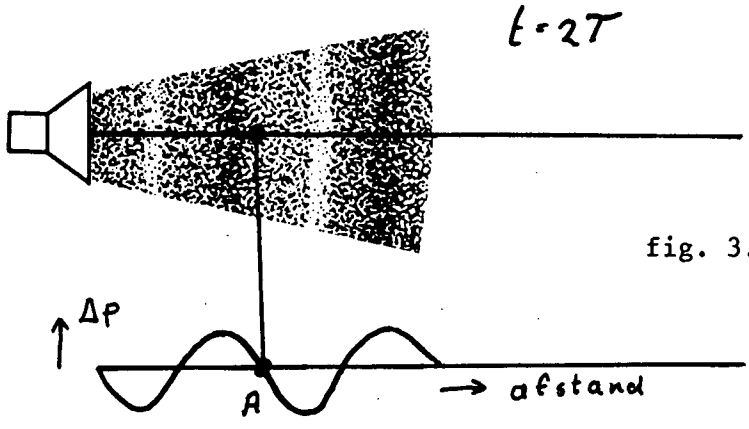


fig. 3.6

De druk van zo'n "lopende" geluidsgolf varieert dus rond de barometerstand. De maximale drukverhoging of verlaging noemen we de drukamplitude of kortweg amplitude (A)

3.1 *Bepaal zelf waar het begin van de geluidsgolf op $t = 2\frac{1}{2}\ T$ en $t = 3\ T$ is aangekomen en teken de bijbehorende diagrammen van de afstand en Δp.*

3.2 *Hoe zal de druk op de plaats A van fig.3.3 varieren in de tijd? Maak een diagram van de drukverandering en de tijd op plaats A van 0 tot 3T.*

Als je op plaats A een mikrofoon houdt en die aan een oscilloskoop verbindt, maak je de luchtdrukveranderingen in punt A zichtbaar. Je krijgt op het skoopbeeld steeds stukjes van het diagram van de drukverandering en de tijd te zien.

3.2 GOLFLENGTE EN VOORTPLANTINGSSNELHEID

In lucht plant geluid zich voort met een constante snelheid: de geluidssnelheid, mits de temperatuur van de lucht overal gelijk is. Bij 20 °C is de geluidssnelheid 340 m/s. In andere stoffen kan de geluidssnelheid heel anders zijn, meestal veel groter. Zoek de geluidssnelheid in stoffen maar eens op in het BINAS tabellenboek.
In één trillingstijd gaat het begin van een geluidsgolf steeds één bepaald stuk vooruit. Omdat er dan een stuk bijgekomen is van precies één verdunning en één verdichting (een compleet "golfje"), noemen we dat de *golflengte*. Het symbool voor de golflengte is λ (Lambda, de Griekse letter l). Omdat de golflengte λ steeds in één trillingstijd T wordt opgelegd, is $\frac{\lambda}{T}$ de snelheid waarmee de golf zich voortplant, v.

Dus geldt: $v = \frac{\lambda}{T}$ of $v = \lambda . f$

Luchtdrukveranderingen waarnemen

Opdracht 3.4: Met behulp van een microfoon kunnen luchtdrukveranderingen omgezet worden in een elektrisch signaal, dat weer aan een skoop toegevoerd kan worden.
Maak een toon van een stemvork, toongenerator of stem met een microfoon zichtbaar op de skoop.
Teken het beeld dat op de skoop gevormd wordt en leg uit wat de figuur betekent in termen van luchtdrukveranderingen op een bepaalde plaats in de loop van de tijd.

fig. 3.7

Het meten van golflengte en geluidssnelheid in lucht

Opdracht 3.5: Bouw de volgende opstelling. In plaats van mikrofoon en versterker kan je de decibelmeter gebruiken.

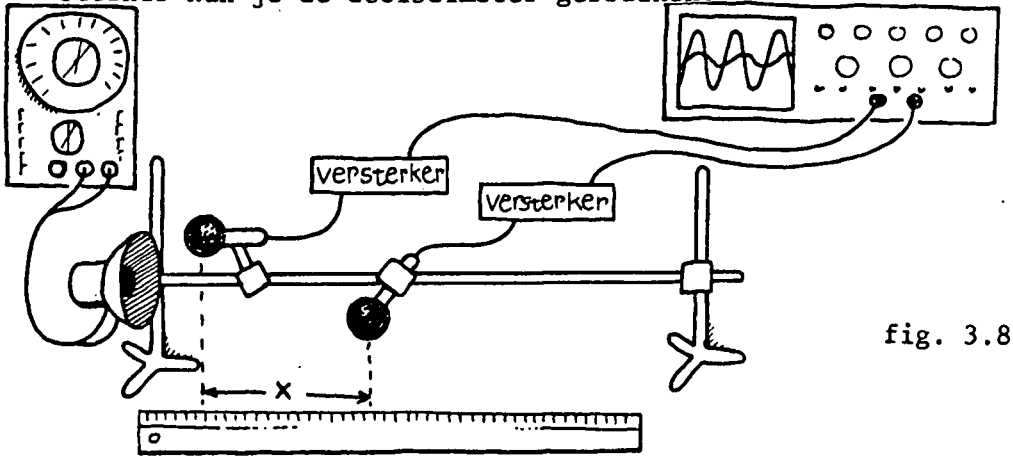


fig. 3.8

Stel de toongenerator op ongeveer 2000 Hz.
Laat de afstand x tussen de twee microfoons vanaf 0 cm toenemen en meet de afstand waarbij de patronen op de dubbelstraalscoop weer samenvallen. Leg uit dat de afstand tussen de twee microfoons dan precies één λ is. Bereken met deze afstand de geluidssnelheid met de formule $v = \lambda . f$. Herhaal de meting voor verschillende frequenties. Probeer zo nauwkeurig mogelijk te werken: bedenk daarvoor een handigheidje die je bij hoge frequenties kunt toepassen.
Welke andere methoden om de geluidssnelheid te bepalen ken je? Zijn die nauwkeuriger dan deze, volgens jouw verwachting? Leg je antwoord uit. Je kunt ook die proeven uitvoeren.

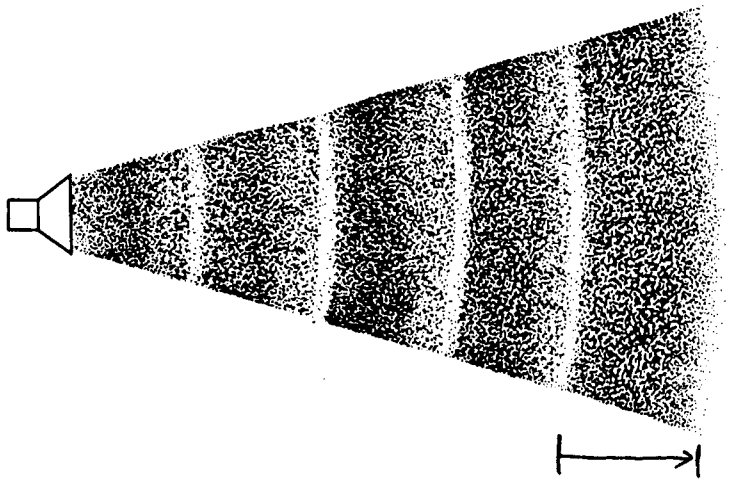
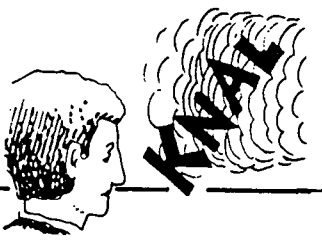


fig. 3.9

3.3 Hoe is de formule voor golflengte, trillingstijd en voortplantingssnelheid?

4 GELUIDSSTERKTE



4.1 HOE LUID?

In dit hoofdstuk gaan we op zoek naar een methode om geluiden met elkaar te vergelijken, met name als het er om gaat hoe hard of hoe luid ze klinken. Geluid kan goed beschreven worden als een variatie in de luchtdruk. Een geluid dat steeds even hard klinkt heeft steeds dezelfde drukamplitude. Harder geluid heeft een grotere drukamplitude. Zacht geluid, bijvoorbeeld het ruisen van de wind, heeft een amplitude van rond 0,5 Pa (Pa staat voor pascal = N/m^2, de eenheid van druk).
Het hoorbare gebied omvat drukvariaties, die in amplitude een faktor 10^6 uit elkaar te liggen.
Een andere maat voor hoe hard het geluid klinkt is de hoeveelheid energie, die in een bepaalde tijd in ons oor terecht komt. Van belang is dat je de energie bekijkt per *tijd* en per *oppervlak*. Een groter oppervlak dan het oor zal meer energie ontvangen zonder dat het geluid harder klinkt. Daarom gebruiken we de intensiteit I: dat is *de hoeveelheid energie die per seconde door een oppervlak van 1 m^2 beweegt. Dit oppervlak staat loodrecht op de geluidssnelheid.*

4.1 Wat is de eenheid van de intensiteit I?

Om praktische redenen wordt ook de intensiteit I echter zelden gebruikt. De intensiteiten van het nog nèt hoorbare geluid en het geluid dat pijn doet aan je oren liggen maar liefst een faktor 10^{12} uit elkaar!
De algemeen gebruikelijke grootheid is het intensiteitsniveau IL (intensity level) of geluidssterkte met als eenheid de decibel (dB).
Deze is zo gekozen dat bij vertienvoudiging van I het intensiteitsniveau met 10 dB toeneemt. Als I 100 keer groter wordt, neemt IL met 20 dB toe, en als I 1000 keer groter wordt neemt IL met 30 dB toe enz.

Het intensiteitsniveau IL (of de geluidssterkte) is een relatieve grootheid. Dat wil zeggen dat de IL alleen aangeeft hoeveel maal de intensiteit I toeneemt ten opzichte van een gekozen beginniveau I_o. IL=20 dB betekent dus $I = 100\ I_o$.

Algemeen wordt als I_o de intensiteit gekozen die de meeste mensen nog juist kunnen horen. Die bedraagt ongeveer $10^{-12} W/m^2$.
Een verband zoals tussen I en IL, wordt logaritmisch genoemd; de wiskundige schrijfwijze hiervan is:

$$IL = 10 \log \frac{I}{I_o}.$$

(Log staat voor logaritme, een wiskundige bewerking, voorlopig mag je dat zien als de exponent van 10: bijvoorbeeld $100 = 10^2$ dus log 100 = 2)

4.2 Bereken hoeveel dB een $I = 10^{-6}\ W/m^2$ is.
4.3 Bepaal met je rekenmachine hoeveel dB IL toeneemt als de intensiteit 2x groter wordt.
4.4 Hoeveel bedraagt IL bij de hoorbaarheidsgrens.
4.5 Als je weet dat 120 dB ongeveer de pijngrens van het gehoor is, hoeveel W/m^2 komt daarmee overeen?

Geluidssterkte en oscilloskoopbeeld

Opdracht 4.1: Meet op een vastgestelde afstand van een luidspreker, die op een toongenerator is aangesloten, de geluidssterkte met een dB-meter. Draai de volumeknop van de toongenerator lager tot de geluidssterkte 20 dB lager is. Zet op dezelfde plaats een microfoon en bepaal de verhouding tussen de twee amplituden. Theoretisch zou je een verhoudingsgetal 10 verwachten. Klopt dat ook? Kan je dat theoretisch afleiden? Maakt het uit of de dB-meter op de afstand dB of dB(A) staat? Kun je daarvoor een verklaring geven?

Rekenen aan de decibelschaal

Opdracht 4.2: Hier zie je een plaatje van de decibelschaal. Breid deze uit tot 120 dB. (Zie fig. 4.1)

a. Maak er ook kolommen bij die de intensiteit en de druk-variaties aangeven.

INTENSITEITS-VERHOUDING t.o.v. wat we met ons oor net niet horen	GELUIDS-STERKTE	INTENSITEIT in W/m^2	DRUK-AMPLITUDE in Pa
1	0 dB	10^{-12}	$2\ 10^{-5}$
10	10 dB		
100	20 dB		
1.000	30 dB		
10.000	40 dB		
100.000	50 dB		
1.000.000	60 dB		

fig. 4.1

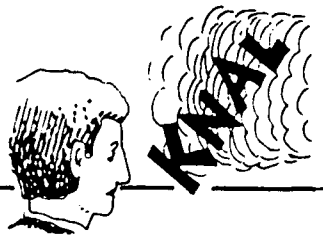
b. Laat zien dat hij de verdubbeling van de intensiteit van geluid (bijvoorbeeld 2 blokfluiten in plaats van 1) de geluidssterkte 3 dB toeneemt.

c. Een extraatje voor wie wil rekenen.
Kloppen de gegevens uit dit stukje met elkaar?
Er staat dat voor de gehoorgrens:

$$I_o = 10^{-12}\ W/m^2$$

$$A_o = 2.10^{-5}\ Pa$$

Vul deze in in de formule van I en A.
Zoek zelf op hoe groot v en ρ zijn.



GELUIDSSTERKTE

Tenslotte nog het verband tussen I, IL en A.
Voor sinusvormige geluidssignalen met een maximale drukvariatie A, voortplantingssnelheid in een medium met dichtheid ρ:

$$I = \frac{A^2}{v.\rho}$$

Dit is geen formule om uit je hoofd te kennen. Wel belangrijk is dat je weet dat I evenredig is met A^2.
Door kwadraat geldt:

$$IL = 20 \log \frac{A}{A_o}$$

Hierin is A_o amplitude van de juist hoorbare drukvariatie.

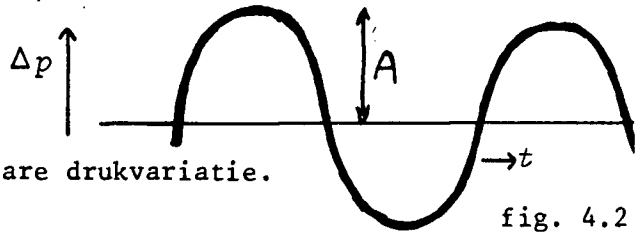


fig. 4.2

4.2 GELUIDSSTERKTE EN LUIDHEID

Strikt genomen geldt alleen voor een frekwentie van 1000 Hz dat de gehoorgrens bij een intensiteitsniveau van 10^{-12} W/m^2 (of amplitudeverschillen van 2.10^{-5} Pa) liggen. Bovendien kan dat per persoon verschillen. In ieder geval hangt de gehoorgrens voor ieder mens sterk af van de frekwentie (evenals de pijngrens), zoals je in fig. 4.3 kunt zien.

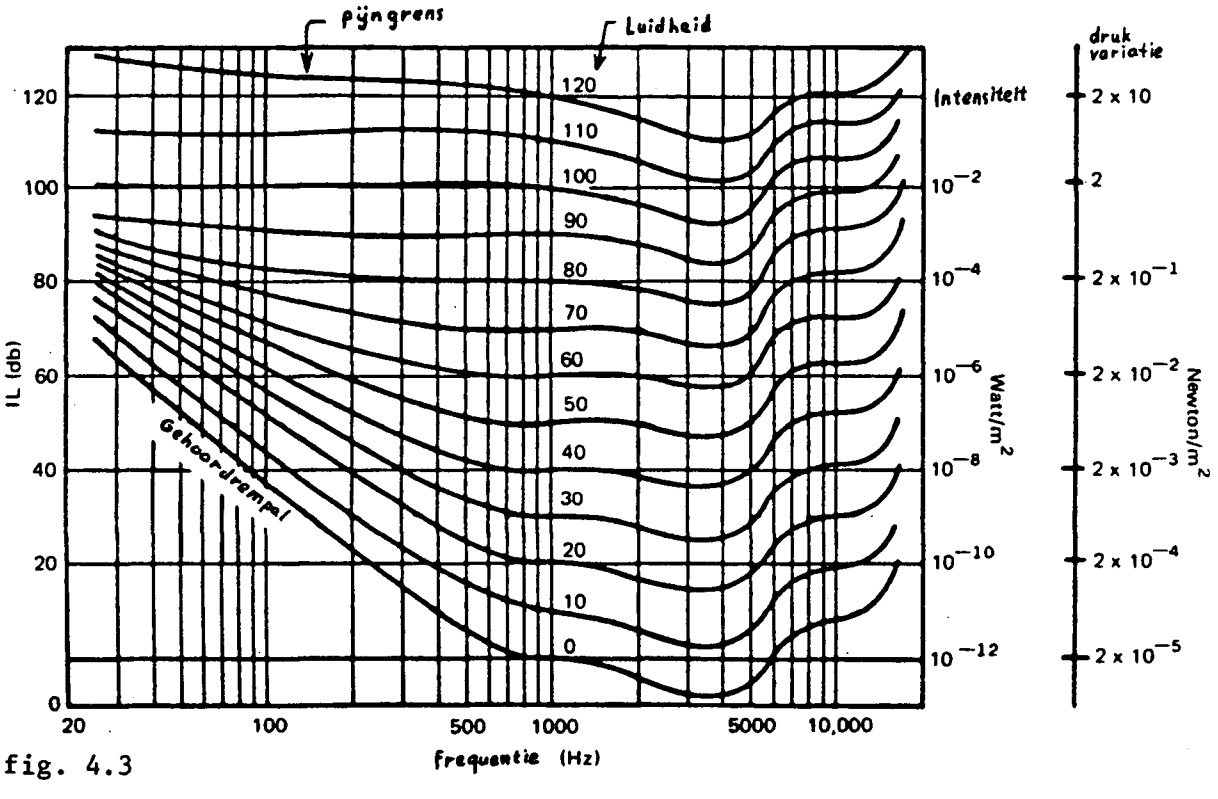
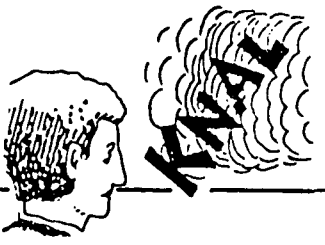


fig. 4.3

Je ziet dat de gehoorgrens voor frequenties tussen 3000 en 4000 Hz nog lager is dan 10^{-12} W/m^2, voor 100 Hz is die aanzienlijk hoger.
Het intensiteitsniveau is dus geen goede maat voor hoe hard je een geluid hoort. Daarom heeft men de grootheid *luidheid* ingevoerd met als eenheid de *foon*.

Opdracht 4.3: Probeer de *IL* en de luidheid van een geluid met een dB-meter te bepalen. Doe dat voor verschillende personen.
Kloppen deze metingen met elkaar? Met de metingen van een dB(A)-meter? Met de grafiek van fig. 4.3?

GELUIDSSTERKTE



Per definitie is de luidheid van een foon van 1000 Hz in foon gelijk aan het intensiteitsniveau (*IL*) in decibel.
Om nu de luidheid van een bepaald geluid van bijvoorbeeld 5000 Hz te bepalen vergelijk je dat geluid met een toon van 1000 Hz. Op het gehoor regel je die toon zo dat die even hard klinkt als het geluid van 5000 Hz. Met een dB meter bepaal je het intensiteitsniveau van de toon van 1000 Hz, bijvoorbeeld 60 dB. Dan is de luidheid van het geluid van 5000 Hz 60 foon. Als je het geluid direct met de dB meter gemeten had, zou je 70 dB gemeten hebben. Deze methode is natuurlijk erg omslachtig. In de praktijk gebruik je de decibelmeter op de stand dB(A) waardoor een filter ingeschakeld wordt, dat je oor nabootst. Voor gevallen waar je de dB meter gebruikt om de geluiden te meten zoals je ze hoort (met andere woorden om de luidheid te meten) zet je de dB meter in de stand dB(A). Als de bepaling precieser moet gebeuren wordt een standaard grafiek gebruikt van het intensiteitsniveau en de frequentie, waarin lijnen van gelijke luidheid (isofonen) getekend zijn. Deze isofonen zijn bepaald als gemiddelde van een grote groep mensen. Per persoon kunnen er dus afwijkingen optreden.

5 RICHTING HOREN

Je oren zijn erg gevoelig voor de richting waar het geluid vandaan komt. In dit hoofdstuk gaan we kijken naar de manier waarop we dat waarnemen. Daarbij hebben we een nieuw begrip nodig, *fase* die we bij de volgende hoofdstukken ook zullen gebruiken.

Laten we aannemen dat geluid uit één trilling, bijvoorbeeld rechts-voor, komt. De geluidsgolf bereikt je rechteroor nèt iets eerder dan je linkeroor omdat je rechteroor iets dichter bij de geluidsbron is. Daardoor kan er bij je rechteroor een drukverlaging zijn als het linkeroor een drukverhoging waarneemt. Je oor is bijzonder gevoelig voor deze verschillen.
Het is gebruikelijk zo'n verschil tussen twee trillingen uit te drukken in een getal: *faseverschil*. Als je linkeroor het geluid met $\frac{1}{2}$ trillingstijd later hoort, neemt het een drukverhoging waar als het rechteroor eendrukverlaging waarneemt. Dat is ook het geval als het tijdsverschil $1\frac{1}{2}\ T$, $2\frac{1}{2}\ T$ enz. is. Het faseverschil is dan $\frac{1}{2}$, $1\frac{1}{2}$, $2\frac{1}{2}$ enz.
Faseverschil kan alle waarden aannemen. Als het groter is dan 1 is het gebruikelijk om alleen de breuk te gebruiken. Het faseverschil wordt daardoor "gereduceerd" tussen 0 en 1: we noemen dat het gereduceerde faseverschil.
Faseverschil kan je op twee manieren uitrekenen, afhankelijk van de vraag of je het tijdsverschil of afstandsverschil weet of kunt bepalen.

1. Als je het tijdsverschil Δt kent, kan je gaan tellen hoeveel (stukken van) trillingstijden die tijd groot is. Als Δt 3 trillingstijden groot is, is het fase verschil 3. Algemeen geldt:

$$\Delta \phi = \frac{\Delta t}{T}$$

$\Delta \phi$ is het faseverschil. Spreek uit delta phi. Phi is een Griekse letter en staat voor fase.

2. Als je het afstandsverschil tussen de bron en je beide oren kent, kan je het faseverschil ook uitrekenen. Eén golflengte extra betekent ook één trillingstijd langer en dus een faseverschil 1.
Daarom kan je het faseverschil bepalen door na te gaan hoeveel golflengten λ er op het afstandsverschil Δx passen. In formulevorm:

$$\Delta \phi = \frac{\Delta x}{\lambda}$$

Opdracht 5.1: Doe je ogen dicht en laat een van je medeleerlingen een geluid maken. Geef aan waar het geluid vandaan komt.
De leerlingen kunnen daarbij gebruik maken van:
- hoge en lage tonen
- terugkaatsing van geluid tegen een muur
- gerichte geluidsbundels.

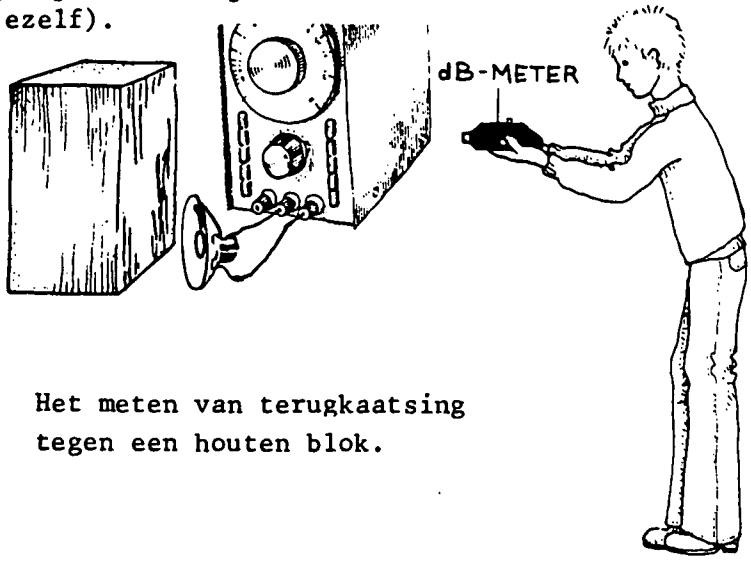
Probeer na te gaan wat de invloed daarvan op het richting horen is. Probeer er ook achter te komen of er leerlingen zijn die beter richting kunnen horen dan anderen.

fig. 5.1

Uit welke richting?

Opdracht 5.2: Onderzoek met een dB-meter of met een oscilloscoop hoe de verschijnselen buiging en terugkaatsing afhangen van de grootte van een obstakel. Gebruik geluidsbronnen met verschillende frequenties en obstakels (liefst vierkant of rond) van allerlei grootte.
Voorkom zo mogelijk hinderlijke effekten van andere voorwerpen (o.a. jezelf).

fig. 5.2



Het meten van terugkaatsing tegen een houten blok.

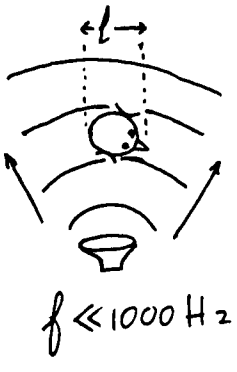
RICHTING HOREN

5.1 In de praktijk maakt het niet uit welke van de twee formules je neemt. Ze zijn in feite hetzelfde. Ga dat maar na met de formules $\Delta x = v . \Delta t$ en $\lambda = ...$

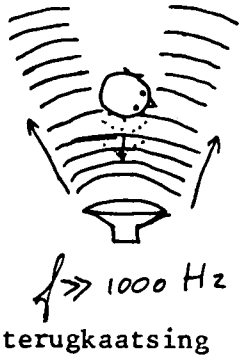
Bij frequenties boven ongeveer 1000 Hz lukt het richting horen met behulp van faseverschil niet meer. Dat heeft te maken met golflengte en de grootte van het hoofd.

5.2 Laat zien dat de golflengte van een toon van 1000 Hz 34 cm is.

De afstand tussen je oren is ongeveer 20 cm. Geluid wordt door grote oppervlakken teruggekaatst, maar om kleine oppervlakken kan het heenbuigen. Nu zijn groot en klein relatieve begrippen. Hier bedoelen we groot en klein ten opzichte van de golflengte van het geluid. Als vuistregel geldt dat een obstakel groter dan $1\frac{1}{2}\ l$ het geluid terug kaatst. Is het kleiner dan $1\frac{1}{2}\ l$, dan buigt het geluid er omheen.



buiging fig. 5.3



terugkaatsing fig. 5.4

Je hoofd is ook zo'n obstakel. Golflengten groter dan ± 30 cm (dus f < 1000 Hz) buigen er om heen. Het gevolg is dat je beide oren het geluid ongeveer even hard horen. Maar er kan een faseverschil zijn. Kleinere golflengten worden vooral teruggekaatst. Het ene oor hoort een kleinere geluidssterkte dan het andere. Boven 1000 Hz wordt de richting vooral bepaald door verschillen in de geluidssterkte die beide oren waarnemen.

5.3 Bereken het faseverschil tussen beide oren van de mens. 2 manieren, zowel voor f = 200 Hz als voor f = 3000 Hz.

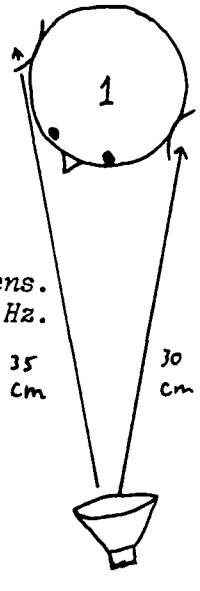


fig. 5.5

Opdracht 5.3: Onderzoek het faseverschil en het verschil in drukamplitude dat je oren waarnemen voor verschillende frequenties en verschillende richtingen van het geluid. Gebruik daarvoor twee kleine microfoons die je bij je oren houdt en die op een dubbelstraalsoscilloscoop zijn aangesloten.

Opdracht 5.4: Maak de volgende opstelling:

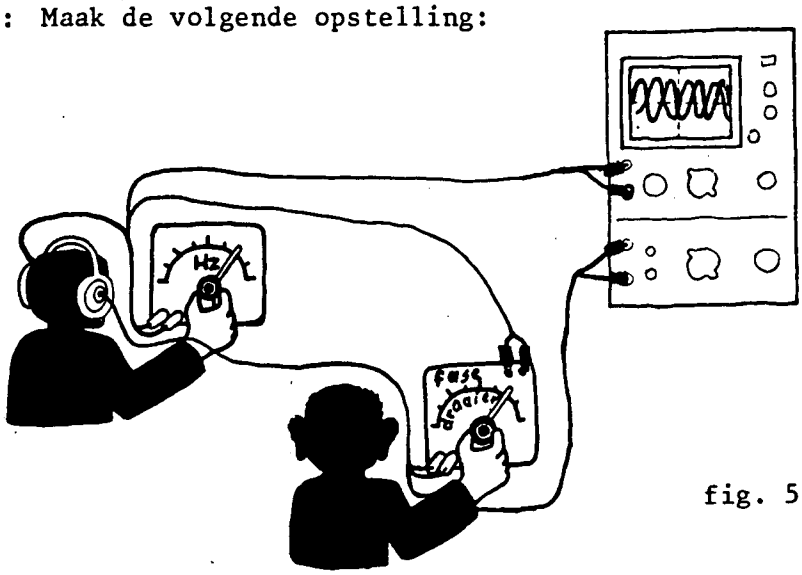


fig. 5.6

Zet de koptelefoon op en probeer de richting van het geluid dat je hoort te bepalen. Ga de invloed van de fase- en het volume-verschil na voor verschillende frequenties. Zet beide signalen op de dubbelstraalsoscilloscoop.

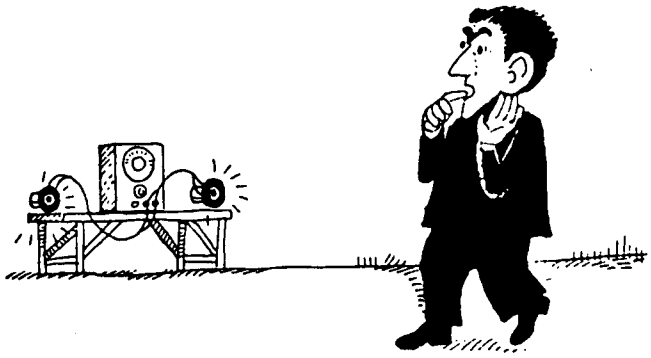
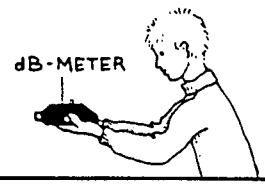


fig. 5.7



6 GELUID BINNEN EN BUITEN

Geluid dat voor een open raam wordt voortgebracht, verdwijnt naar buiten en komt (bijna) niet terug. Het geluid plant zich met de geluidssnelheid voort steeds verder van de geluidsbron af. Zolang de geluidsbron met constante frequentie aanstaat komt er in één trillingstijd steeds één golflengte bij. Het geluid "loopt" van de geluidsbron weg: een lopende geluidsgolf.
Geluid dat in een dichte kamer wordt voortgebracht kan zich echter heel anders gedragen. Het wordt door de muren gedeeltelijk teruggekaatst, gedeeltelijk opgenomen (geabsorbeerd). De oorspronkelijke geluidsgolf en de teruggekaatste geluidsgolf werken op een ingewikkelde wijze op elkaar in. Sommige geluidsgolven hebben een golflengte die zo goed in een kamer passen dat deze versterkt worden (resonantie).
In dit hoofdstuk gaan we deze verschijnselen beter bekijken en naar verklaringen zoeken.

6.1 KWADRATENWET

Geluid breidt zich uit naar alle kanten. Meestal niet naar alle kanten even veel omdat een geluidbox bijvoorbeeld zo gemaakt is dat hij het geluid naar voren richt.

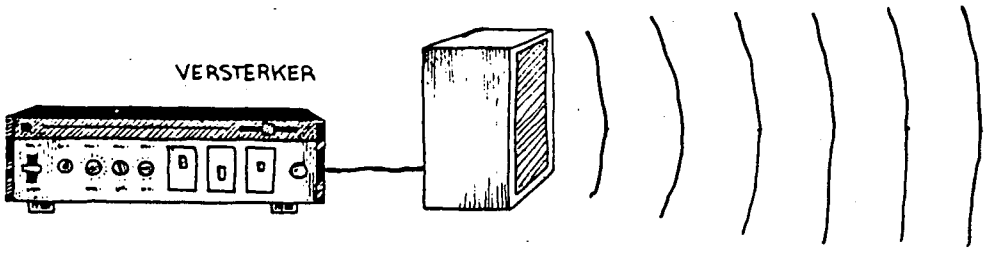


fig. 6.1

Stel je een geluidsbron voor dat wèl evenveel geluid naar alle kanten zendt.

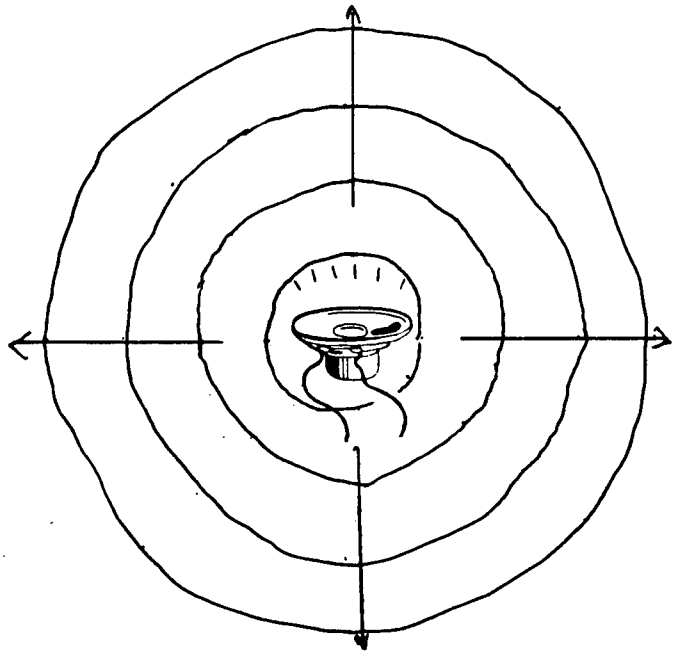


fig. 6.2

Opdracht 6.1: Probeer een opstelling te maken zò dat volgens jouw verwachting de kwadratenwet ongeveer zal gelden. Ga na of dat klopt. Probeer de belangrijkste oorzaken van afwijkingen op te sporen en zo mogelijk weg te nemen.

Opdracht 6.2: Onderzoek de geluidsreflekterende eigenschappen van verschillende soorten wandmateriaal (o.a. verschillende stijfheid en porositeit). Gebruik daarvoor de volgende opstelling.

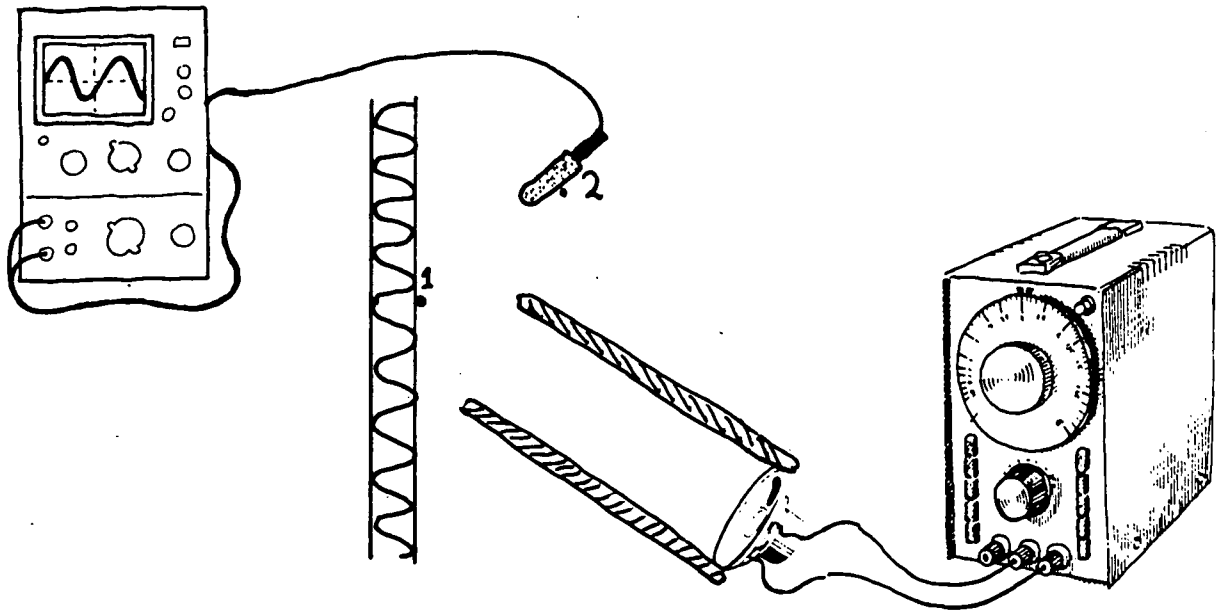
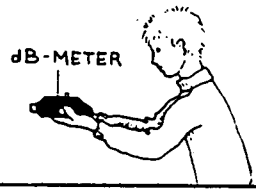


fig. 6.3

Meet steeds de geluidssterkte op plaats 1 en 2 zonder reflekterende wand en op plaats 2 met reflekterende wand.
Probeer een schatting te geven van de absorptiecoefficient.
Ga de invloed van de frequentie na.
Waarom zal de meting bij lagen frequenties minder goed lukken dan bij hogere frequenties?
Probeer een oplossing voor dat probleem te vinden.



Dan breidt het geluid zich als een steeds groter wordende bol om de geluidsbron uit. We nemen aan dat er geen geluidsenergie van de bol geabsorbeerd wordt. Dan blijft de totale energie op de bol gelijk, maar per vierkante meter neemt de energie af omdat de bol groter wordt. Als de straal van de bol verdubbelt neemt de oppervlakte van de bol kwadratisch toe. ($A = 4 \Pi r^2$). De energie per m^2, dus de intensiteit neemt dus kwadratisch af met de afstand (kwadratenwet). Als je oor de helft minder vermogen per m^2 waarneemt, betekent dat, dat de geluidssterkte 3 dB afneemt. Bij verdubbeling van de afstand neemt de intensiteit af tot een vierde, dus dan neemt de geluidssterkte 6 dB af. Let wel dat daarbij drie veronderstellingen zijn gemaakt:
- naar alle kanten evenveel geluid
- geen geluidsabsorbtie in de lucht
- geen terugkaatsing.

6.2 TERUGKAATSING.

Het bovengenoemde geval komt nauwelijks voor: het is een geidealiseerd model. In feite is er altijd sprake van enige absorptie in de lucht, maar vooral van invloed van het aardoppervlak, kamerwanden enz. die geluid absorberen en terugkaatsen. Daarom neemt de geluidssterkte in een kamer niet af met de afstand. Door een ingewikkeld patroon van terugkaatsingen tegen vloer, wanden en plafond is de geluidssterkte overal even groot. In een concertzaal of schouwburg zijn de afstanden veel groter en moeten bijzondere maatregelen getroffen worden om overal evenveel geluidssterkte te hebben.

Het ene uiterste geval bij het botsen van geluid tegen een wand is volledige terugkaatsing: alle op de muur in vallende energie wordt teruggekaatst.

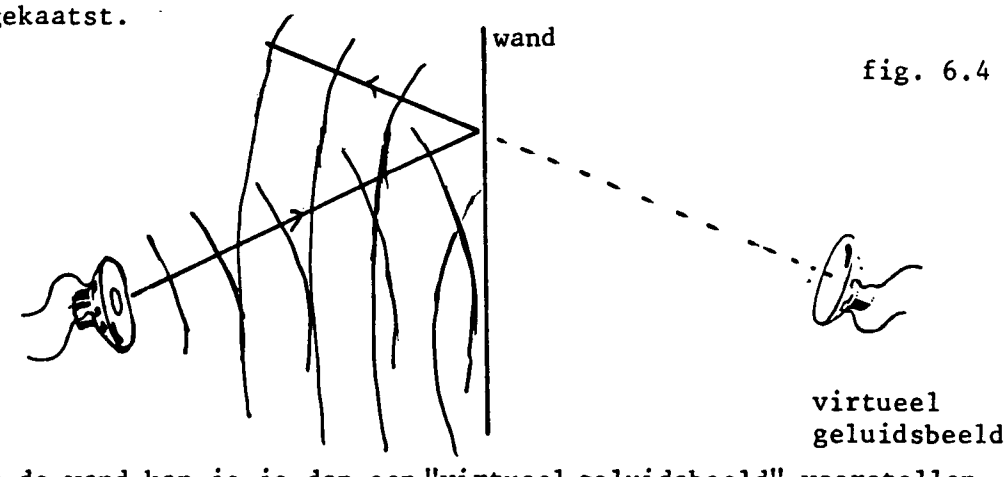


fig. 6.4

Achter de wand kan je je dan een "virtueel geluidsbeeld" voorstellen. Het andere uiterste geval is de volledige absorptie: van het geluid dat op de wand valt wordt niets teruggekaatst. Bij een open raam is dat het geval, maar ook bij speciale akoestische wandbekleding. De meeste wanden absorberen het geluid gedeeltelijk en kaatsen het gedeeltelijk terug.

Opdracht 6.3: Maak de volgende opstelling.

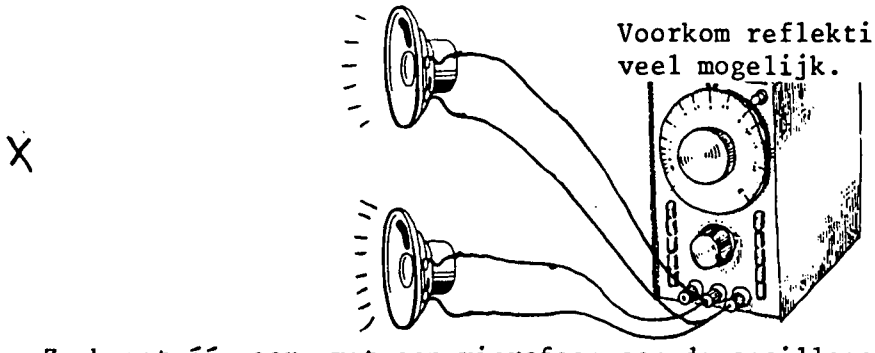


fig. 6.5

Zoek met één oor, met een microfoon aan de oscilloscoop of met de dB-meter plaatsen op waar uitdoving en versterking optreedt. Meet de afstanden tot de luidsprekers op en bepaal het afstandsverschil Δx. Omdat beide luidsprekers geluid met dezelfde fase uitzenden zal naar verwachting versterking optreden als $\Delta x = 0, \lambda, 2\lambda$ enz. en uitdoving als $\Delta x = \frac{1}{2}\lambda, 1\frac{1}{2}\lambda, 2\frac{1}{2}\lambda$ enz. Leg dat uit.
Klopt dat met het resultaat wat jij meet?
Kies verschillende frequenties, bijvoorbeeld steeds op ongeveer een oktaaf afstand.

Opdracht 6.4: Maak de volgende opstelling

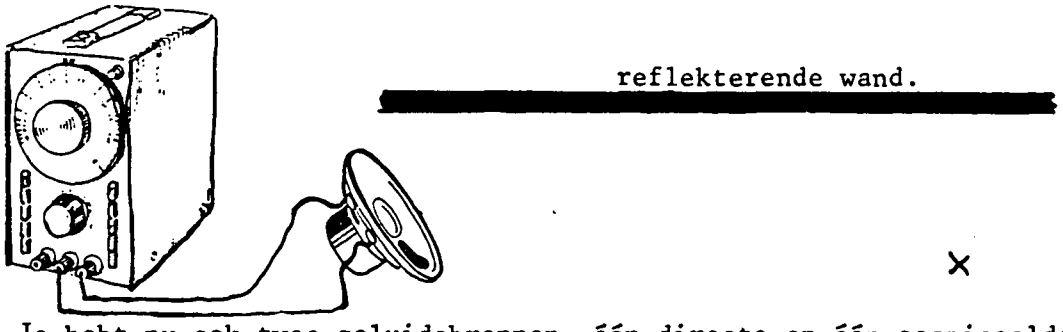
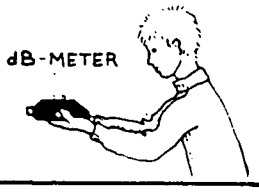


fig. 6.6

Je hebt nu ook twee geluidsbronnen, één directe en één gespiegelde.
Voer de opdracht als 10.3 uit. Kloppen de regels voor Δx in dit geval?
Zo niet, kan je dan een andere regel opstellen?
Wat is je conclusie betreffende de fase bij terugkaatsing tegen een wand?

Opdracht 6.5: *Deze proef kan je ook thuis doen.*
Gebruik een stereo geluidsinstallatie. Draai van één van de twee boxen de aansluitingen om. De fase van al het geluid dat deze box voortbrengt verschilt nu $\frac{1}{2}$ met de normale situatie.
Zet nu een plaat op met veel lage tonen.

Waarom vallen de lage tonen veel meer weg dan de hoge tonen?
Is het effekt groter of kleiner als je de tuner op mono zet?



De *absorptiecoefficient* geeft de verhouding tussen het geabsorbeerde vermogen en het totaal opvallende vermogen. Voor zalen en kamers is de absorptiecoefficient voor reflektie belangrijk.
Voor geluidsoverlast van stereoinstallaties is de absorptiecoefficient voor transmissie (het geluid dat door de wand heen gaat) belangrijk.

6.3 INTERFERENTIE

Door terugkaatsing van de geluidsgolven tegen de vloer, de wand, het plafond en het interieur kunnen in één punt van de kamer heel wat geluidsgolven bij elkaar komen. Het regelmatige patroon van één geluidsgolf die met 340 m/s langs dat punt trekt wordt daardoor danig verstoord. De drukveranderingen in dat ene punt worden bepaald door alle geluidsgolven die dat punt passeren. Daardoor kan het voorkomen dat het geluid in dat punt aanzienlijk versterkt wordt, of juist uitgedoofd. Dat is een storend verschijnsel bij het luisteren naar muziek, want de muziek wordt daardoor vervormd. Of het geluid in een bepaald punt versterkt of verzwakt wordt hangt af van het faseverschil tussen de geluidsgolven. Is het faseverschil ½ (of 1½, 2½ enz.) dan is er ten gevolge van de ene golf een drukverhoging en tegelijker tijd tengevolge van de andere golf een drukverlaging (of andersom). Die twee werken elkaar dus tegen en het geluid wordt verzwakt of zelfs uitgedoofd. Bij faseverschil 0 (of 1, 2 enz.) versterken de twee golven elkaar.
Tengevolge van interferentie kan de geluidssterkte in allerlei punten van een lokaal verschillend zijn.
Omdat $\Delta = \frac{\Delta x}{\lambda}$ (Δx is het afstandsverschil, λ de golflengte) liggen de punten waar versterking en uitdoving optreden het verschillend voor verschillende golflengten.

6.4 NAGALM EN ECHO

Een ander gevolg van terugkaatsing en absorptie is de echo. Een geluid dat op een bepaalde plaats wordt uitgezonden komt na kortere of langere tijd weer terug. Belangrijk is de tijd tussen het begin van het uitgezonden geluid en de tijd dat je dat begin weer hoort: initial delay. Bij tweede en derde echo's spreek je van second en third delay.

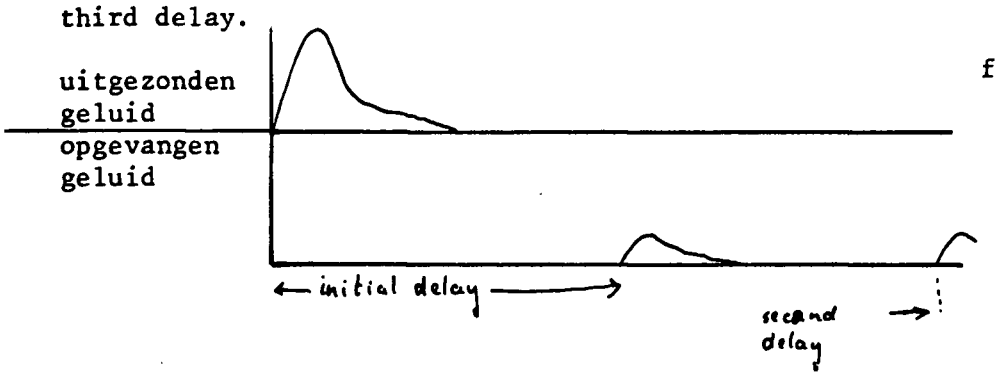


fig. 6.7

Opdracht 6.6: Neem een geluidsdichte kist of doos en monteer daarin een luidspreker en een microfoon. Sluit de luidspreker aan op een blokspanning. Twee maal per periode zal er een "tik" klinken, die in de kist nagalmt.
Bepaal de T_{20} uit het skoopbeeld:

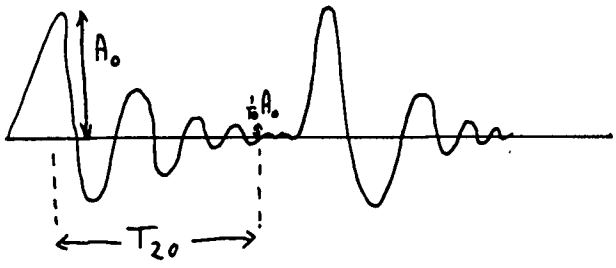


fig. 6.8

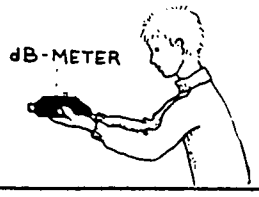
Bereken daaruit de T_{60}.

Varieer zo mogelijk de absorbtie van de wanden en ga de invloed daarvan na op de T_{60}.

Opdracht 6.7: Neem een geluidsdichte kist of doos met luidspreker en microfoon.
Bepaal de resonantiefrequenties. Bepaal ook de theoretisch te verwachten resonantiefrequenties. Kloppen deze waarden met elkaar? Kan je oorzaken van eventuele verschillen ontdekken?

Geluid in de klas

Opdracht 6.8: In de klas kan je verschillende van de hier beschreven effekten waarnemen: terugkaatsing, resonantie, nagalm en echo. Gebruik daarvoor een toongenerator met luidspreker. Als meetinstrumenten kun je gebruiken: je oor en een decibelmeter. Doe metingen op verschillende plaatsen.
Ga na wat het effekt is van veranderingen in de klas: bijv. ramen en gordijnen open of dicht; lege klas e.d. Probeer de effekten te verklaren.



Echo is het beste te horen als er slechts één obstakel is waar het geluid tegen terugkaatst zodat het bij de waarnemer terug komt: de bodem van een echoput, een heimachine bij een rij huizen en dergelijke. In een besloten ruimte zijn er altijd minstens 4 wanden, plafond en de vloer waartegen het geluid kan terug kaatsen. Daardoor wordt de echo uitgesmeerd: het duurt enige tijd voordat het geluid uitgestorven is. We noemen dat verschijnsel nagalm.
Als karakteristieke tijd voor de nagalm wordt de *nagalmtijd* genomen; symbool T_{60}. Daarmee wordt de tijd bedoeld die verloopt tussen het beeindigen van het voortbrengen van het geluid en het moment dat het geluid van de nagalm 60 dB lager is geworden. In de praktijk meet je altijd T_{20}. Want 60 dB geluidsafname is moeilijk te meten. Als je 120 dB geluid zou meten (de pijngrens) moet je wachten tot het geluid 60 dB is, wat al nauwelijks meer hoorbaar is in een wat rumoerige omgeving.
Om T_{60} te berekenen kun je gewoon 3 maal T_{20} nemen. Dat komt omdat de uitsterftijd van de nagalm logaritmisch is, zoals uit opdracht 10.6 blijkt. En de dB schaal is ook logaritmisch.

6.1 De uitslag die je op de skoop meet is een maat voor de drukvariatie Δp. Ga na dat 20 dB precies een faktor 10 in spanning op de skoop betekent.

De nagalmtijd hangt voornamelijk af van het volume V van de ruimte en het geluidsabsorberend oppervlak van de wanden en het interieur (meestal uitgedrukt in het aantal m^2 open raam: 2 m^2 oppervlak met een absorbtiecoefficient van 0,5 geldt als 1 m^2 open raam). Voor een concertzaal geldt als ideaal een nagalmtijd van 1 s voor een zaal waarin verstaanbaar gesproken moet worden wil men 0,5 s nagalm hebben. De reden daarvan is dat spraak kortere lettergrepen heeft dan muziek.

6.5 RESONANTIE

Een bijzonder geval van interferentie is resonantie.
Resonantie treedt op bij bepaalde frequenties. Die frequenties worden véél meer versterkt dan andere frequenties. Dat komt omdat de golflengte, die bij die frequentie hoort, precies bij de afmetingen van de ruimte past:zodanig dat vlak bij de wanden de druk voortdurend toe- en afneemt en in het midden de lucht nu eens de ene kant, dan weer de andere kant op beweegt, volgens het volgende patroon:

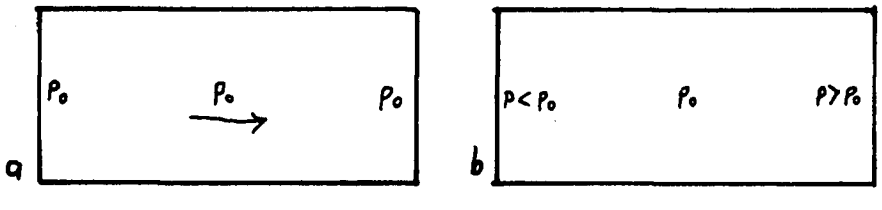


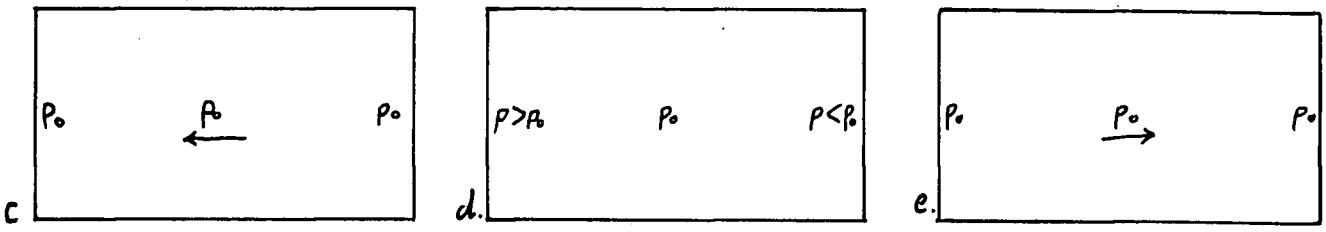
fig. 6.9

t= 0: overal gelijke druk in het midden bewegen de molekulen naar rechts.

t= $\frac{1}{4}T$: er zijn verdunningen en verdichtingen aan de wanden ontstaan. De lucht begint weer van rechts naar links te bewegen.

vervolg op blz. 45

vervolg fig. 6.9



$t = \frac{1}{2}T$: door de beweging van de lucht zijn de drukverschillen opgeheven. De luchtstroom echter door naar links.

$t = \frac{3}{4}T$: Nu is links een verdichting en rechts een verdunning ontstaan.

$t=T$: de situatie is weer gelijk aan t = 0

Het is makkelijker alleen met druk-plaats diagrammen te werken waarin de twee uiterste waarden voor de druk aangegeven staan. De grootte van de uiterste waarden noemen we de drukamplituden op verschillende punten. In tegenstelling tot een gewone (lopende) geluidsgolf, waar de drukamplituden overal gelijk zijn, is hier de drukamplitude in elk punt anders.

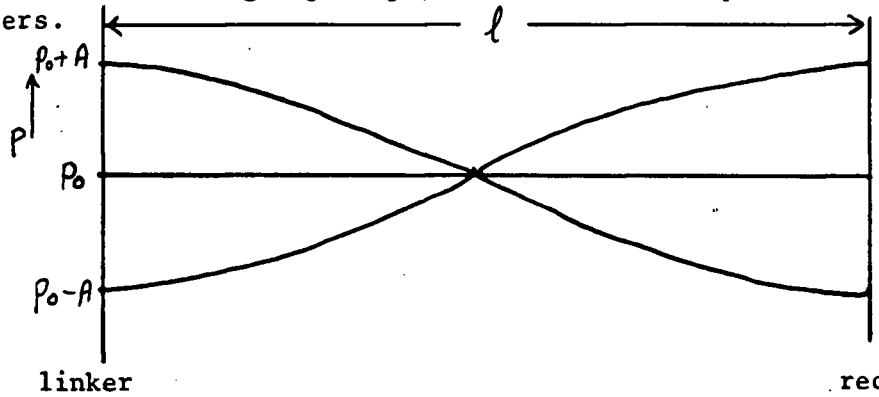


fig. 6.10

Uit deze figuur kan je zien dat de afstand l tussen de wanden een halve golflengte is, dus $\lambda = 2l$. Als frequentie krijg je:

$$f = \frac{v}{\lambda} \text{ dus } f = \frac{v}{2l}$$

voor een kamer van 4 x 4 m krijgen: l = 4m

$$f = \frac{340}{2.4} = 42{,}5 \text{ Hz.}$$

Dit is de eerste resonantie f_0 wordt wel de grondtoon genoemd.
Er zijn nog andere mogelijkheden voor resonantie op dezelfde lengte.

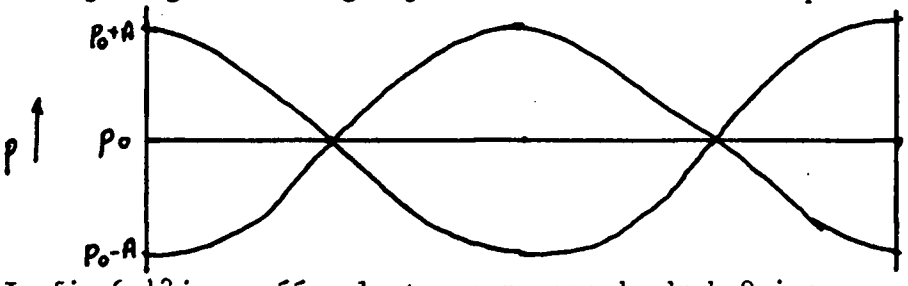


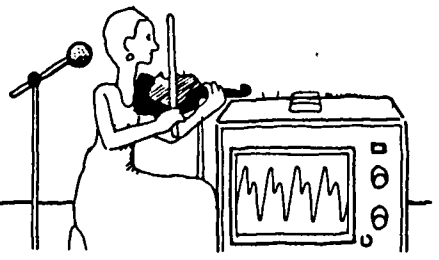
fig. 6.11

In fig.6.12 is er één plaats meer waar de druk 0 is: er past nu precies één golflengte op de lengte l.

$f_1 = \frac{v}{l}$ als l = 4m dan: f_1 = 85 Hz.

Zo krijgen we de 2e resonantie. Dit noemen we de boventoon.

6.2 Bepaal zelf de frequentie van de 3e resonantie.



7 KLANKKLEUR EN HET OOR

7.1 KLANKKLEUR

In de muziek zijn naast toonhoogte ook belangrijk:
1. de sterkte van de toon
2. de klank van de toon.

In dit hoofdstuk zullen we ons wat verdiepen in de klank van tonen, ook wel *klankkleur* genoemd.
Verschillende muziekinstrumenten klinken heel anders, ook als ze dezelfde toon voortbrengen. Ze hebben een andere klankkleur. Behalve ze te horen kan je dat ook zichtbaar maken op de oscilloscoop. In fig. 7.1 zie je de oscilloscoop beelden (oscillogrammen) van 3 instrumenten die misschien ook door een van jullie bespeeld worden: de viool, de hobo en de waldhoorn.

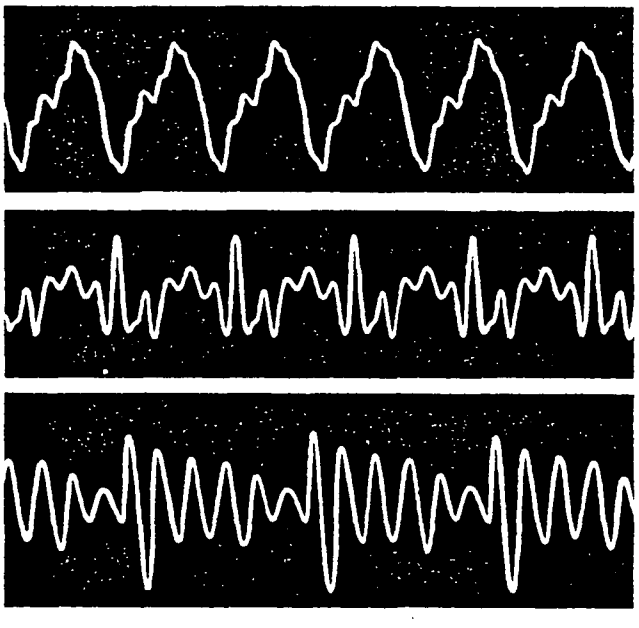


fig. 7.1

Deze oscillogrammen komen uit het "middendeel" van een toon. De aanzet en het uitsterven van de toon kunnen andere beelden opleveren.
Omdat de klankleur van de instrumenten in grote mate bepaalt hoe een muziekstuk klinkt, zijn er in de loop van de eeuwen heel wat muziekinstrumenten bedacht, die allemaal een karakteristieke klankkleur hebben.
Dat mensen zich soms erg om klankkleur bekommeren, blijkt uit het feit dat er ook nu nog met moderne middelen, bijvoorbeeld electronica (synthesizers) naar nieuwe geluiden wordt gezocht. Aan de andere kant zijn mensen bereid voor oude violen (Stradivarius) met een extra mooie klank tienduizenden guldens neer te tellen.
Waardoor zit dat mooie of bijzondere van een klank nu in?
De oscillogrammen van muziekinstrumenten geven wel een aanwijzing, maar ook als de oscillogrammen van 2 instrumenten sprekend op elkaar lijken kan ons oor toch verschillen waarnemen. Ons oor is een zeer gevoelig instrument. Als je meer weet over hoe het oor werkt en een klank waarneemt kan je ook meer te weten komen over de vraag welke fysische verschillen er zijn tussen tonen met verschillende klankkleur. Bovendien is het dan mogelijk een toon uiteen te rafelen zoals het oor dat ook doet.

KLANKKLEUR EN HET OOR - OPDRACHTEN

Opdracht 7.1: Maak een lijst van 10 muziekinstrumenten (stemvork en toongenerator erbij) die ieder een karakteristiek geluid voortbrengen. Speel op allemaal dezelfde toon en probeer de verschillen die je hoort te omschrijven, bijvoorbeeld wat betreft de klank, de aanzet en het uitsterven van de toon.

Opdracht 7.2: Maak het geluid van een aantal muziekinstrumenten zichtbaar op het oscilloscoop scherm.
Teken of fotografeer zo mogelijk het geluidspatroon!

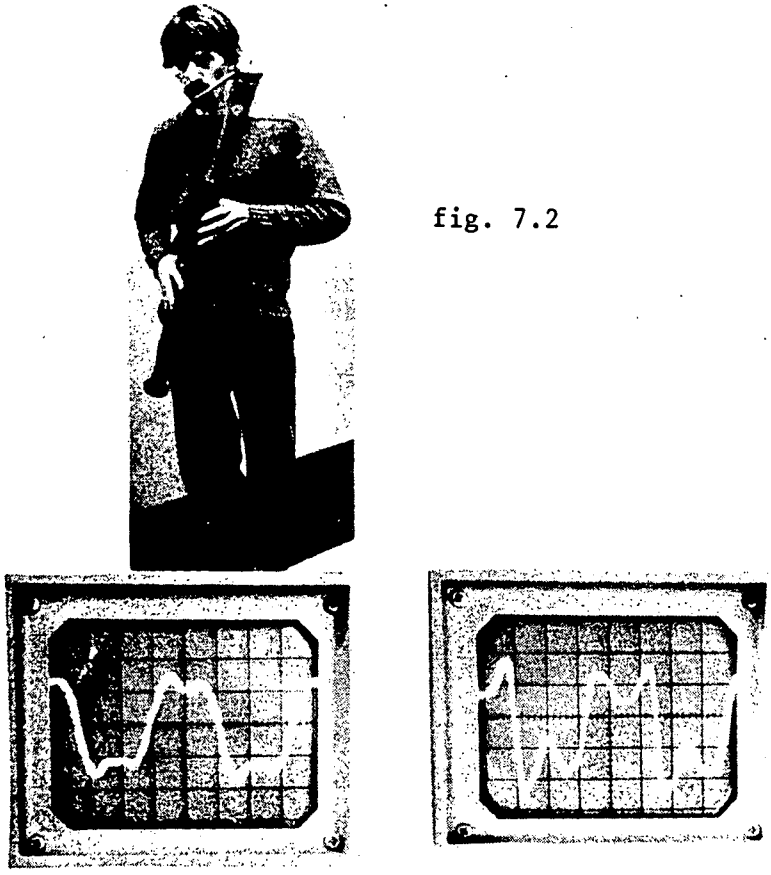
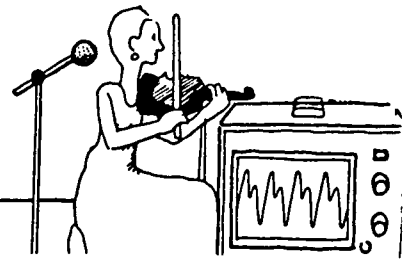


fig. 7.2

fig. 7.3



7.2 HOE ZIT HET OOR IN ELKAAR?

In fig.7.2 is te zien hoe het menselijk gehoororgaan er ongeveer uitziet.
De geluidsgolven komen via de *uitwendige gehoorgang* bij het *trommelvlies* dat zij in beweging brengen.
De uitwendige gehoorgang heeft een dusdanige vorm dat sommige frequenties door resonantie meer versterkt worden dan andere. Het gebied tussen 3000 en 5500 Hz wordt ongeveer 3 maal versterkt en naar de hogere en lagere tonen neemt deze versterking af.
De trillingen van het trommelvlies worden via de middenoorbeentjes *hamer, aambeeld* en *stijgbeugel* versterkt aan het *ovale venster* doorgegeven.
Deze versterking is voor alle frequenties ongeveer gelijk.
Het ovale venster is het membraan dat het binnenoor afsluit. In dit binnenoor bevindt zich het *slakkenhuis (cochlea)*. Dit is een lang, opgerold kanaal (± 35 mm lang), dat in de lengterichting door het *basilaire membraan* in tweeën is gedeeld. Het slakkenhuis is verder gevuld met een vloeistof waardoor de geluidsgolven zich gaan voortplanten.
Op het basilaire membraan bevinden zich de zintuigcellen die verantwoordelijk zijn voor de omzetting van de trilling in een elektrisch signaal, dat via de gehoorzenuw naar de hersenen gevoerd wordt.
We kunnen ons het basilaire membraan voorstellen als een in de lengterichting (vanaf het ovale venster gerekend) steeds slapper wordend elastisch vlies.
Dat vlies kan gaan meetrillen onder invloed van de geluidsgolven die via het trommelvlies, hamer, aambeeld, stijgbeugel en ovale venster overgegeven zijn aan de vloeistof in het slakkenhuis.
Elk punt van het vlies heeft zijn eigen resonantiefrequentie. Dicht bij het ovale venster is het vlies strak gespannen en is

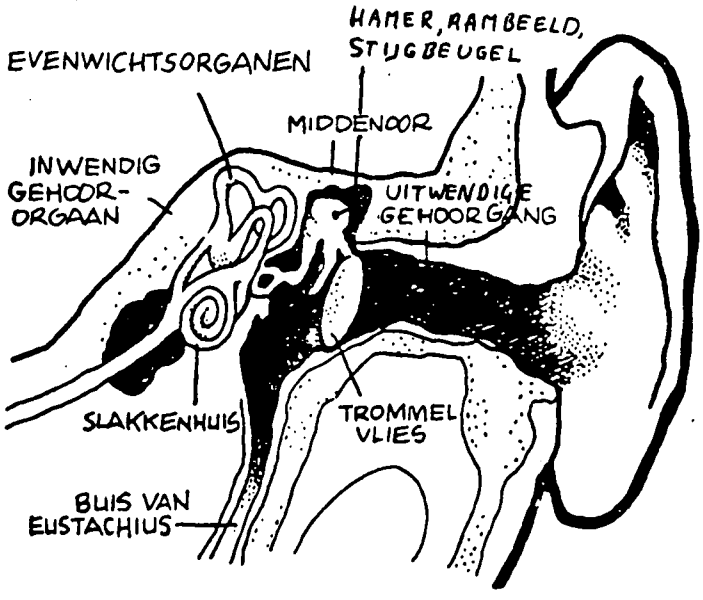


fig. 7.4 Het menselijk gehoororgaan.

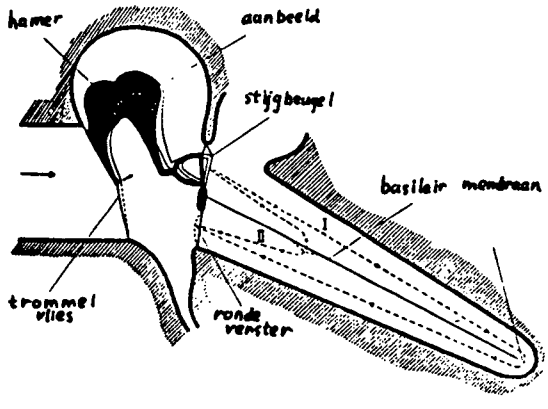


fig. 7.5 De trillingen van het trommelvlies worden via hamer, aambeeld en stijgbeugel overgebracht op het ovale venster. (Het slakkenhuis is in deze tekening "uitgerold".)

fig. 7.6 Schematische tekening van het binnenoor.

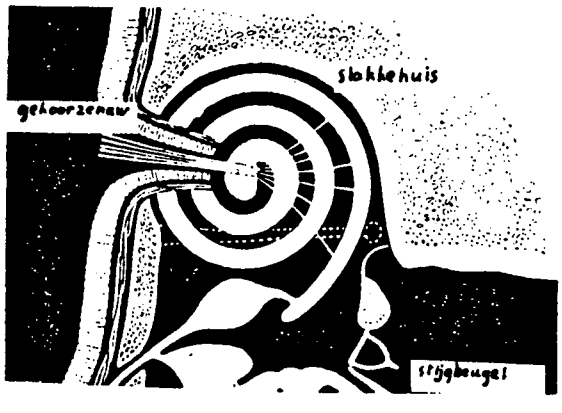


fig. 7.5 het optellen van twee trillingen met gelijke frekwentie en gelijke fase

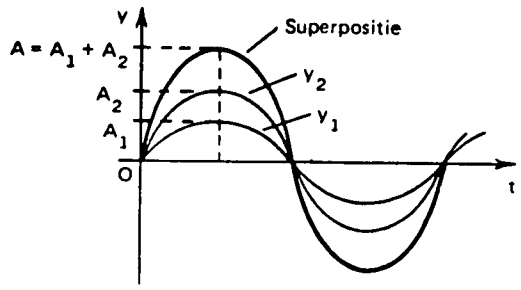
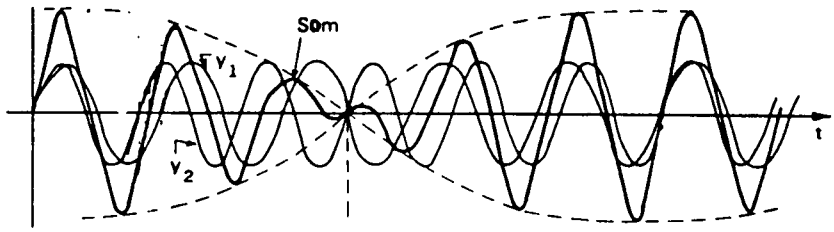
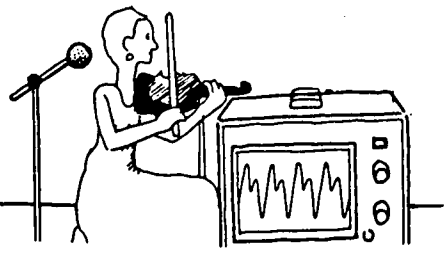


fig. 7.6
het optellen van twee trillingen met gelijke fase op t = o en ongelijke frekwentie. Het resultaat is een zweving met een frekwentie gelijk aan $\Delta f = f2 - f$.

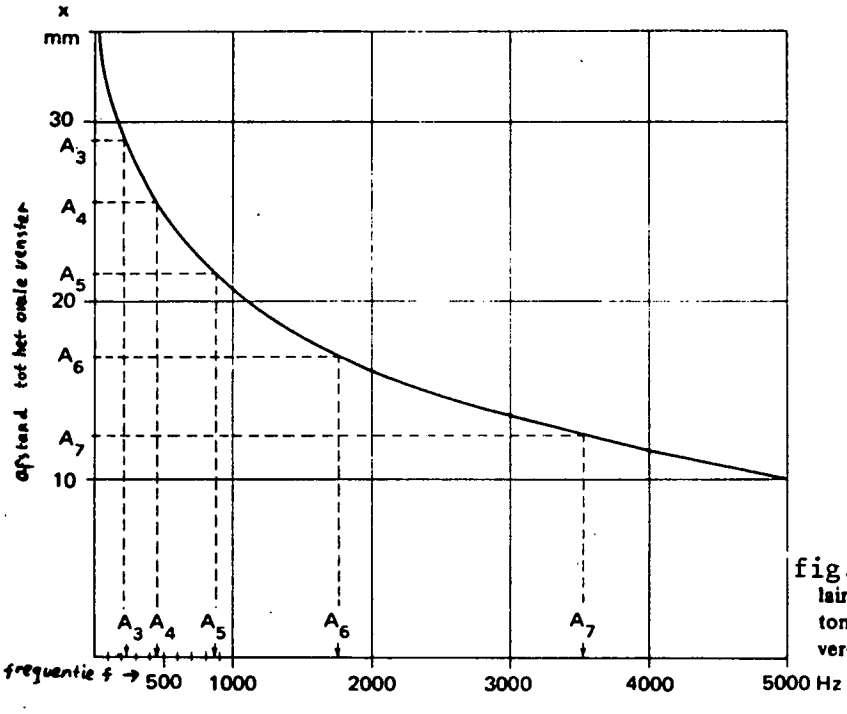


Opdracht 7.3: Teken een sinus met amplitude 3 cm en periode 18 ms (op papier 18 cm) en een sinus met amplitude 1 cm en periode 6 ms (6 cm) en tel deze grafisch op.

Opdracht 7.4: Laat een proefpersoon een aantal zuivere en complexe tonen horen, zonder dat hij/zij weet hoe de tonen opgewekt zijn. (Misschien kan je ze op de band opnemen, je kunt proberen het aanzetten en/of het uitsterven van de toon weg te laten.)
Laat hem/haar bepalen of de zuiver of complex zijn en laat hem/haar raden naar de herkomst van het geluid.
Bekijk zo mogelijk de geluiden op de oscilloscoop.



de resonantiefrequentie hoog. Verder weg zijn de resonantiefrequenties lager. Het overloop van de resonantiefrequenties langs het basilaire membraan is niet lineair: bij de lage frequenties neemt een interval van 100 Hz veel meer lengte in beslag dan bij hoge frequenties. Zie fig. 7.3 en fig. 7.4.



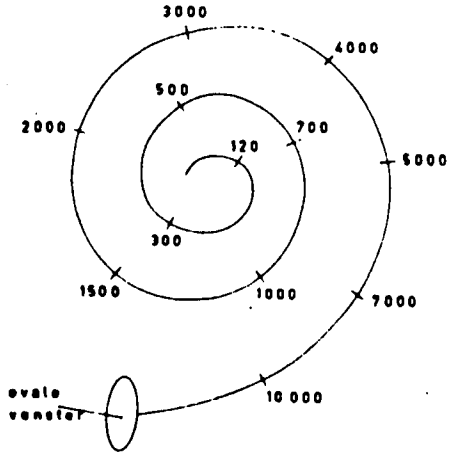


fig.7.4 Locatie van de frequentie langs het basilaire membraan. De streepjes duiden aan, waar tonen van gegeven frequenties een maximale uitslag veroorzaken.

fig.7.3 Resonantieplaatsen op het basilaire membraan bij verschillende frequenties A4 is een toon van 440 Hz, A5 is een oktaaf hoger, A3 is een oktaaf lager.

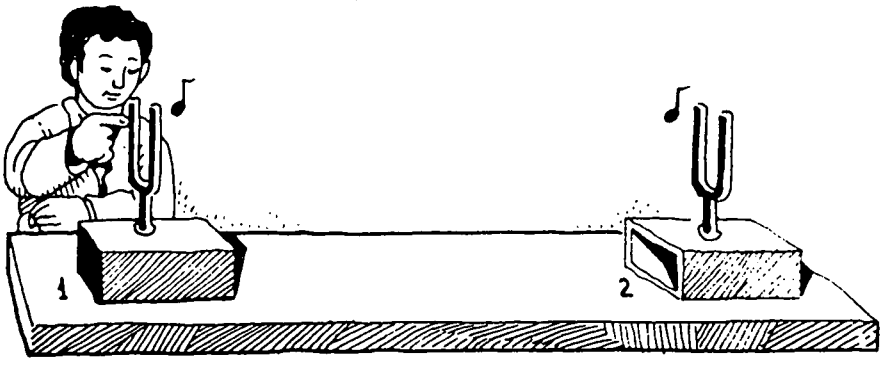
Uit fig.7.4 zie je dat de frequenties van 20 tot 4000 Hz die het meeste in muziek voorkomen ook het grootste deel van het basilaire membraan in beslag nemen: ongeveer 2/3 deel van ongeveer 12 tot 35 mm.

7.1 *Ga uit fig.7.3 na dat verdubbeling van frequentie betekent dat het bijbehorende resonantiegebied 3,5 à 4 mm verschuift.*
Wat heeft dat te maken met de indeling van tonen in oktaven?

7.3 SINUSVORMIGE EN COMPLEXE TONEN

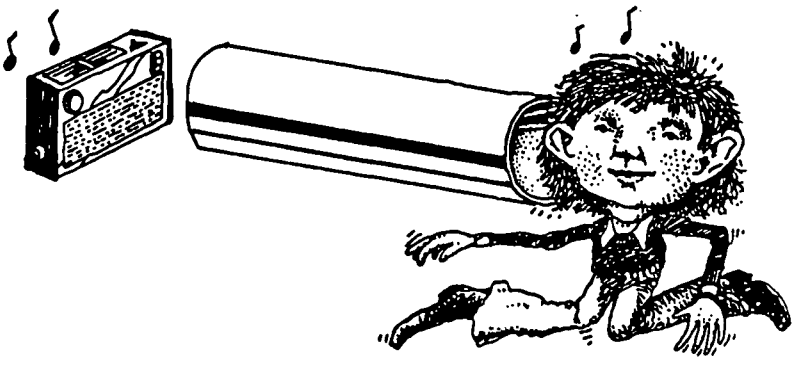
Het blijkt dat er slechts één plaats op het basilaire membraan gaat meetrillen als de geluidsgolf op de oscilloscoop een sinusvormige drukvariatie laat zien. We horen dat als een zuivere toon.
Als de drukvariatie niet sinusvormig is gaan er meer plaatsen op het basilaire membraan meetrillen en horen we dat als een wat ingewikkeldere toon, meestal complexe toon genoemd.
Laten we als voorbeeld nemen een toon die het basilaire membraan laat meetrillen op twee plaatsen, bijvoorbeeld de plaatsen die gaan meetrillen zijn zuivere tonen van 600 en 850 Hz. Deze zelfde toon horen we ook als we twee afzonderlijke tonen van 600 Hz en 850 Hz in de juiste sterkteverhouding laten horen.
Daarom is het de gewoonte elke toon te beschrijven als de som van een aantal sinusvormige (zuivere) tonen. Het oor rafelt het geluid toch uiteen in die "componenten".

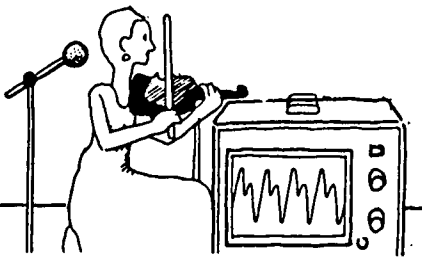
Opdracht 7.5: Maak een zweving met bijvoorbeeld twee stemvorken. Laat de zweving op de oscilloscoop zien en probeer de zwevingsfrequentie te bepalen.



Opdracht 7.6: Hoe scherp afgegrensd is het gebied waar het membraan trilt?
Biedt 2 sinusgolven aan via koptelefoon één oor aan, eerst gelijke frequentie, daarna steeds groter verschil.
Doe dit bij verschillende geluidssterkten.
Om aan te tonen dat het effekt te wijten is aan overlap op het membraan, vergelijk met stereofonische aanbieding.
Variant (kwantitatief): laat bij een aantal geluidssterkten het frequentieverschil noteren waarbij nèt twee tonen afzonderlijk hoorbaar zijn.
Is er verschil tussen hoge en lage frequenties, verschillende geluidssterkten?

Opdracht 7.7: Luister eens naar de radio of lawaai om je heen met een lange koker aan je oor (je andere oor dicht). Wat merk je op?
Bepaal met een toongenerator en luidspreker bij welke frequentie(s) sinustonen extra versterkt worden door de koker. Geef een verklaring voor de "filterwerking" van de koker.





KLANKKLEUR EN HET OOR

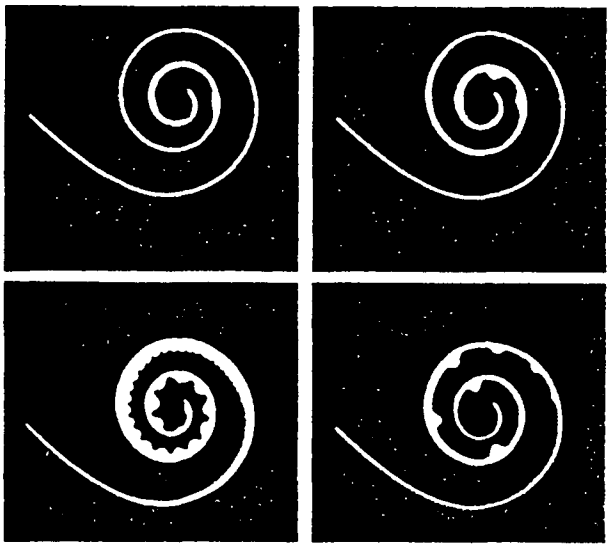


fig. 7.5
Het basilaire membraan krijgt op één plaats een uitwijking voor een (niet al te harde) zuivere toon (a).
Voor 2 zuivere tonen bijvoorbeeld 600 en 850 Hz krijgt het uitwijkingen op twee verschillende plaatsen (b).
Voor een stoomfluit (c) met veel tonen en een trompet (d) gaan meer plaatsen meetrillen.

De klankkleur verschillen tussen instrumenten worden bepaald door de verschillen in componenten van de tonen. Om dezelfde toonhoogte te hebben moet de belangrijkste (sterkste) toon dezelfde zijn. Door meer componenten in wisselende sterkte toe te voegen krijg je verschillende klankkleuren.
Als twee tonen tegelijk klinken, maar slechts weinig van elkaar verschillen in frequentie, krijg je *zwevingen* te horen: de amplitude van de samengestelde drukvariatie varieert met een frequentie die gelijk is aan de verschilfrequentie. Zie fig. 7.6b.

a

b

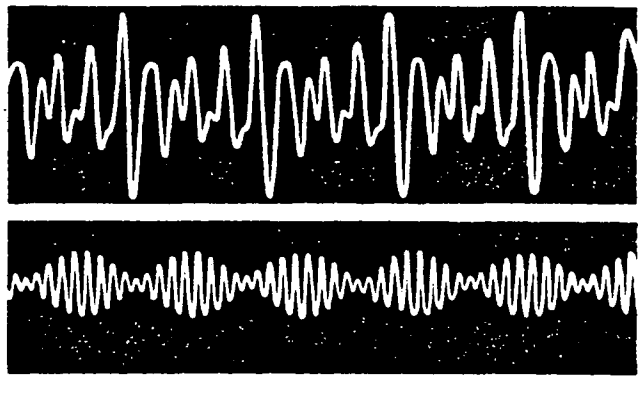


fig.7.6 Het oscillogram van 4 stemvorken tegelijk.

Een zweving van twee stemvorken met bijna gelijke frequentie.

Zo hoor je twee tonen van 440 en 446 Hz als één toon van 443 Hz met een zweving van 6 Hz.
De plaatsen op het basilaire membraan die gaan meetrillen overlappen elkaar.

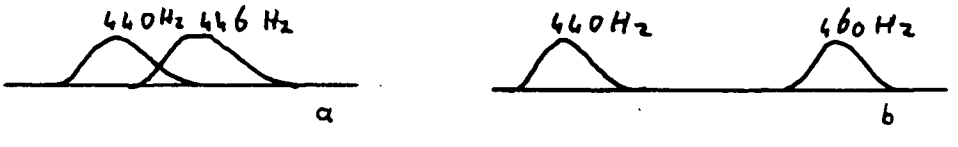
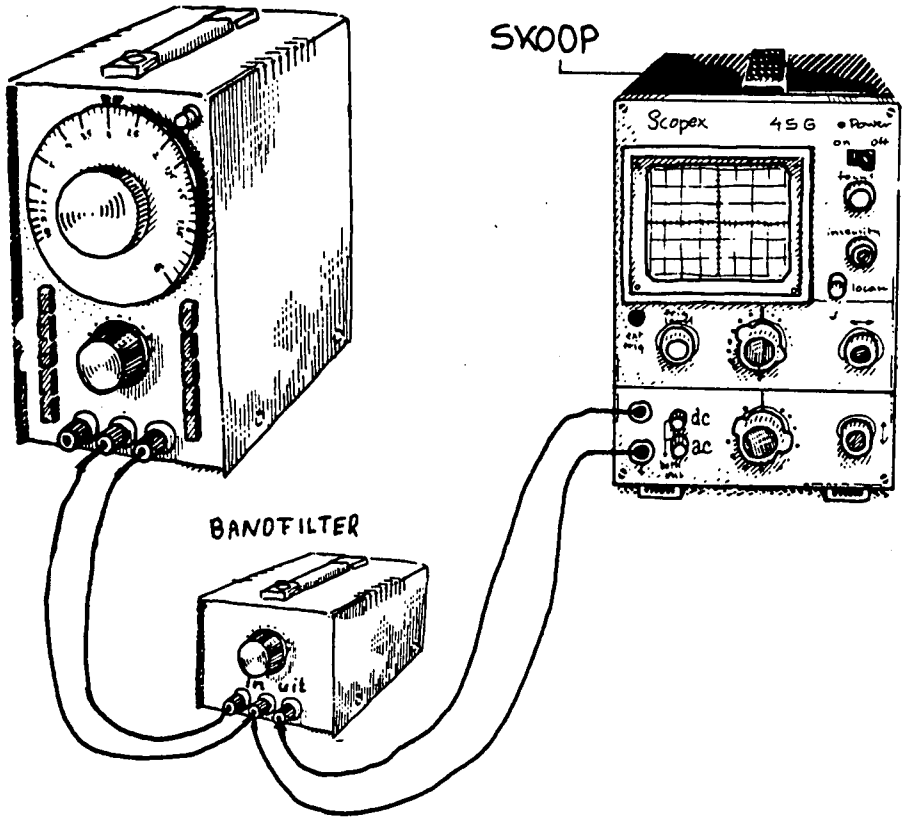


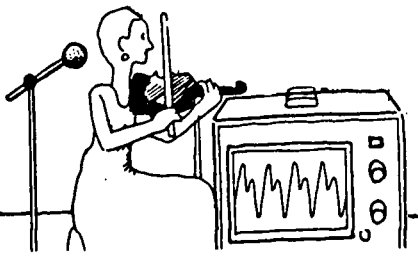
fig. 7.7

Als die plaatsen elkaar niet overlappen, bijvoorbeeld 440 en 460 Hz, dan hoor je afzonderlijke tonen.
Hoor je twee tonen nà elkaar of elk in een ander oor met een koptelefoon, dan hoor je de zwevingen niet. Wel kun je dan nagaan hoe scherp je twee tonen met (weinig) frequentie verschil van elkaar kunt onderscheiden (just notable difference, uitgedrukt in %).

Opdracht 7.8: Sluit op de ingang van het bandfilter een sinusgenerator aan, maak deze sinus zichtbaar op een dubbelstraaloscilloscoop. Maak de uitgangsspanning van de generator niet hoger dan 1 V in amplitude, sluit hierna de uitgang van het bandfilter aan op andere straal van de skoop.
Draai langzaam aan de knop van het filter tot het uitgangssignaal (2) maximaal is.
Meet frequentie en amplitude van het ingangs en uitgangssignaal bij het bandfilter. Conclusie?



Opdracht 7.9: De "kwaliteit" van het filter wordt uitgedrukt door de ingestelde frequentie (die het best wordt doorgelaten) te delen door de "breedte" van de band van fig. 7.8. De breedte van de band is het verschil in frequentie tussen de sinustonen waarvan de amplitude door het filter wordt gehalveerd in formule $Q = \frac{f_{in}}{f}$. Probeer voor jouw filter de grafiek te maken zoals fig. 7.8. Bepaal daaruit de kwaliteit van het filter.



7.4 EEN TOON EN ZIJN COMPONENTEN

Is het ook mogelijk een toon te ontleden in zijn (sinusvormige) componenten zoals het oor dat doet?
Wij zouden wel een heel dure computer nodig hebben om alle componenten van de toon in één keer te bepalen. Wel is het mogelijk de componenten één voor een uit het signaal te halen met behulp van een zogenaamde bandfilter. Hoe een bandfilter gebouwd is, is op het moment niet belangrijk, je moet wel weten wat je er mee kunt doen.
Het filter is een elektrische schakeling die alleen sinustonen kan doorlaten en dan nog slechts alleen diè sinusgolf waarvan de frequentie overeenstemt met de op het bandfilter ingestelde frequentie.

Er bestaan ook mechanische band filters: maar omdat we de signalen toch willen opmeten is het handig een microfoon te gebruiken en het geluid electronisch te filteren. Bovendien gaat dit veel netter dan met een mechanisch filter.
Het bandfilter laat natuurlijk niet precies één frequentie door bij één instelling; maar een "band" van frequenties (fig. 7.8) waarbij eén frequentie het best wordt doorgelaten.
Hoe smaller de band, hoe beter is het filter voor onze doeleinden.
Niet-sinusvormige signalen kunnen we met behulp van het bandfilter ontleden.
Door een willekeurig signaal op het bandfilter aan te sluiten kunnen we door langzaam met de wisselknop van het bandfilter te zoeken de verschillende componenten van het signaal zichtbaar maken.

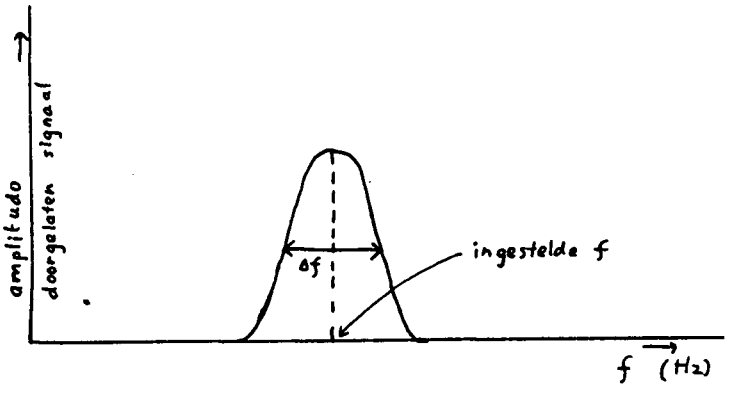


fig. 7.8 Frequentiekarakteristiek van een bandfilter met bandbreedte Δf.

7.5 KLANKKLEUR EN (AFWEZIGE) COMPONENTEN

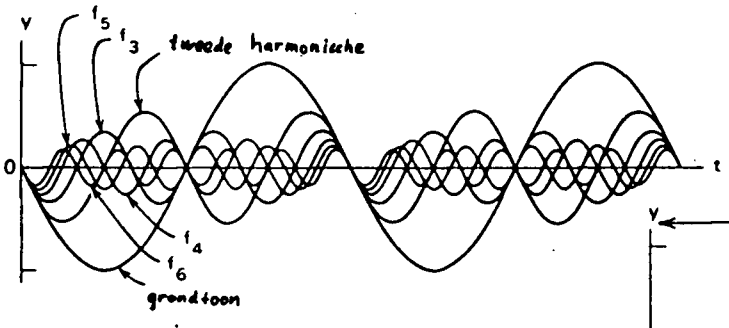
De klankkleur wordt niet alleen bepaald door de aanwezige tonen, ook speciale tonen die niet zelf aanwezig zijn kunnen de klankkleur mede bepalen, speciaal bij hard geluid. Dit zijn de zogenaamde *verschiltonen*. Als je twee toongeneratoren aanzet, de ene bijvoorbeeld op 440 Hz en de andere met een frequentie die je van 440 Hz laat oplopen tot 880 Hz, kan je een derde toon horen, gelijk aan het verschil tussen de twee tonen, bijvoorbeeld 520-440=80 Hz als de variabele toongenerator op 520 Hz staat. De verschiltoon is dus $f_1 - f_2$.
Er zijn zelfs nog andere verschiltonen zoals $2f_1 - f_2$; $3f_1 - 2f_2$.
Deze verschiltonen ontstaan op het basilaire membraan. Het is nog niet goed duidelijk waarom.

vervolg in kader op blz. 55

Opdracht 7.10: Sluit een blokgolf van ± 200 Hz aan op het bandfilter. Zoek alle componenten op en bepaal van elke component de frequentie en de amplitude. Maak een tabel.
Doe dit daarna (indien aanwezig) met een zaagtand.

Opdracht 7.11: Verschil tonen.
Bij presentatie van twee harde sinustonen wordt soms een derde toon waargenomen (is vaak moeilijk te horen).
Biedt ook weer stereofonisch aan om te laten horen dat het een effekt is dat op het membraan ontstaat.
Houd één toon f_1 constant en laat de andere f_2 varieren.
Je kunt de verschiltoon het beste horen als f_2 ligt tussen $1{,}1f_1$ en $1{,}3f_1$.

Opdracht 7.12: Met behulp van het band filter kan de grondcomponent van bijvoorbeeld een blok golf eruit gefilterd worden.
De componenten van een blokgolf met frequentie f_1 zijn $2f_1$, $3f_1$, enz. f_1 wordt er dus uitgehaald. Ga na dat je dan niet een toon hoort met frequentie $f_2 = 2f_1$ (een oktaaf hoger) of $f_3 = 3f_1$ (kwint hoger) maar vrijwel dezelfde toon. Met andere woorden: je hoort f_1 wel, al is die er niet.



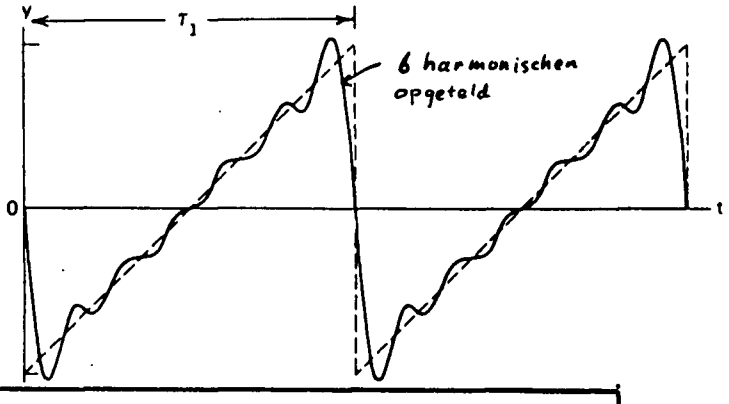


fig.7.9 Fouriersynthese van een zaagtand: De zaagtand kan worden opgebouwd uit een harmonische reeks: f_1, $2f_2$, $3f_1$ enz. van verschillende amplitude's.
Als er 6 harmonischen zijn opgeteld is de zaagtand al goed te herkennen.

Een effekt dat ook aan de verschiltoon toegeschreven kan worden is het horen van de grondtoon (de laatste component van een complexe toon) die er objectief gezien niet is, maar die wel een verschiltoon is van hogere componenten.
Het gevolg is dat je met een radio of versterker die de lage tonen niet kan weergeven ze in veel (muzikale) gevallen toch hoort.
Een ander gevolg is dat tonen die boven de gehoorgrens (20.000 Hz) liggen toch een rol kunnen spelen omdat de verschiltonen wèl in het hoorbare gebied liggen.

8 MUZIEKINSTRUMENTEN

8.1 INLEIDING

Met betrekking tot de toonopwekking kunnen muziekinstrumenten in grofweg 4 soorten ingedeeld worden:
- blaasinstrumenten (blokfluit, trompet, orgel)
- snaarinstrumenten (gitaar, piano, viool)
- slaginstrumenten (trommel, bekken, triangel)
- elektronische instrumenten (elektronisch orgel, synthesizer).

In dit deel zullen we ons beperken tot de principes van blaasinstrumenten en snaarinstrumenten.

Blaasinstrumenten zijn gebaseerd op resonantie van de lucht in een bepaalde buis of anders gevormde ruimte. Meestal spreken we kortweg over de *luchtkolom* van een blaasinstrument. We kunnen *open* en *half-open* luchtkolommen onderscheiden, wat allebei verschillende klankkleuren met zich meebrengt.
Bij snaarinstrumenten wordt de toon opgewekt door het aanslaan, aantokkelen of aanstrijken van een snaar. De snaar gaat trillen, zijn resonantiefrekwenties. Die frekwenties worden versterkt in een klankkast (ook wel resonator genoemd).

8.2 DE OPEN LUCHTKOLOM

Een belangrijke vorm die bij blaasinstrumenten voorkomt is de cilindrische pijp die aan twee kanten open is. De fluit en de open orgelpijp zijn daarvan voorbeelden. In fig.8.1 zie je daarvan een voorbeeld: P is een vingergat in de fluit en Q is de opening van het mondstuk. Omdat de lucht in de pijp bij deze gaten in open verbinding met de buitenlucht staan is de druk daar steeds de druk van de buitenlucht. We noemen dat een *drukknoop*. Elke frequentie die aan deze voorwaarde voldoet zal door de luchtkolom versterkt worden.
De eenvoudigste vorm van de open luchtkolom is een buis die aan beide zijden open is. Zie fig. 8.2.
Tussen de drukknopen aan het begin en eind kunnen één of meer *drukbuiken* optreden: plaatsen waar de lucht opgehoopt en weer weg bewogen wordt, waar de drukvariaties dus het grootst zijn.
De laagste frequentie die kan optreden in de grondfrequentie f_0: één drukbuik in het midden van de kolom.

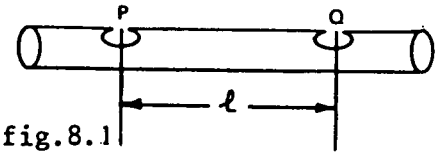


fig.8.1

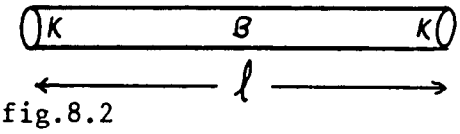


fig.8.2

Deze frequentie kun je uitrekenen: de golflengte λ_0 is $2\,l$ (zie blz. 45). De frequentie is $f = \frac{v}{\lambda}$ dus $f_0 = \frac{v}{2l}$ met v. de geluidssnelheid in lucht.
De volgende frequentie die aan de voorwaarde voldoet is die waarbij in het midden nog een drukbuik ontstaat:

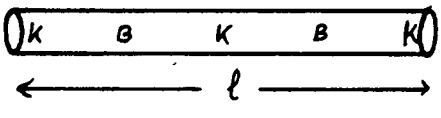


fig. 8.3

Dit is de eerste boventoon met frequentie f_1.

8.1 Ga na dat de frequentie van de eerste boventoon $f_1 = \frac{v}{l}$.
8.2 Ga na dat er meer boventonen zijn. Bepaal de formule voor de tweede, derde en vierde boventoon.

Opdracht 8.1: Neem twee of meer blaasinstrumenten met een duidelijk verschillende klankkleur maar dezelfde grondtoon en maak de tonen die ze produceren zichtbaar op de oscilloscoop.

Opdracht 8.2: Onderzoek met behulp van de bandfilter uit welke sinustonen de tonen bij de bij opdracht 8.1 gebruikte blaasinstrumenten zijn opgebouwd.

Opdracht 8.3: Bepaal de resonantiefrequenties van een luchtkolom in één buis met behulp van de getekende opstelling.

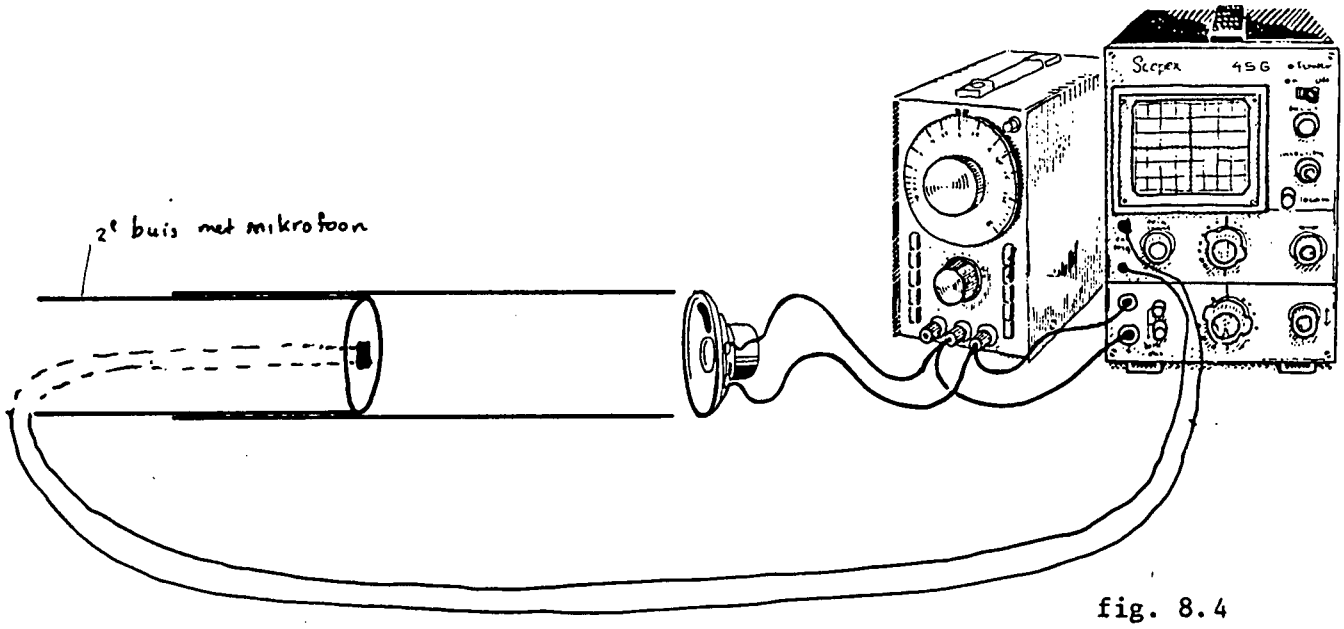


fig. 8.4

Doe dit onderzoek op het gehoor door op maximale versterking in te stellen.
Doe de proef met een gesloten eind van de buis en daarna met een open eind. Je kunt ook een aan beide kanten gesloten buis nemen (één kant afsluiten met de luidspreker).
Meet ook de lengte van de buis op en probeer, nadat je de resonantiegolflengte's hebt berekend, een verband te ontdekken tussen l en f.

Opdracht 8.4: De zelfde proef kun je doen met een buis met variabele lengte. Houdt dan de frequentie constant op bijvoorbeeld 1000 Hz of gebruik een stemvork.
De lengte kan je varieren door een tweede, dunnere buis in de eerste te duwen of door de buis recht op te zétten en gedeeltelijk met water te vullen.

MUZIEKINSTRUMENTEN

De eerste boventoon ligt een oktaaf boven de grondtoon, de 2e boventoon een kwint enz. Dit noemen we een *harmonische reeks*. De belangrijkste muziekinstrumenten die gebruik maken van een open luchtkolom zijn het pijporgel, de fluit en de clarinet.
Het orgel kan verschillende tonen voortbrengen door verschillende lengten orgelpijp.
De klankkleur van het orgel wordt vooral bepaald door de harmonische reeks en de onderlinge verhoudingen in sterkte van de boventonen.
Die verhouding wordt bepaald door de specifieke uitvoering van een orgel: de toegepaste materialen, de diameter van de orgelpijpen en dergelijke.

8.3 *Bereken de lengte van een orgelpijp die een toon van 50 Hz moet produceren en de lengte van een orgelpijp die een toon van 2000 Hz moet produceren.*

8.4 *Hier zie je een foto van een orgel. Verklaar de grote lengteverschillen van de orgelpijpen.*

Met de fluit kan je de ligging van de drukknopen bepalen door het openen of sluiten van de vingergaten.

8.5 *Waarom bestaan er fluiten van verschillende lengten?*

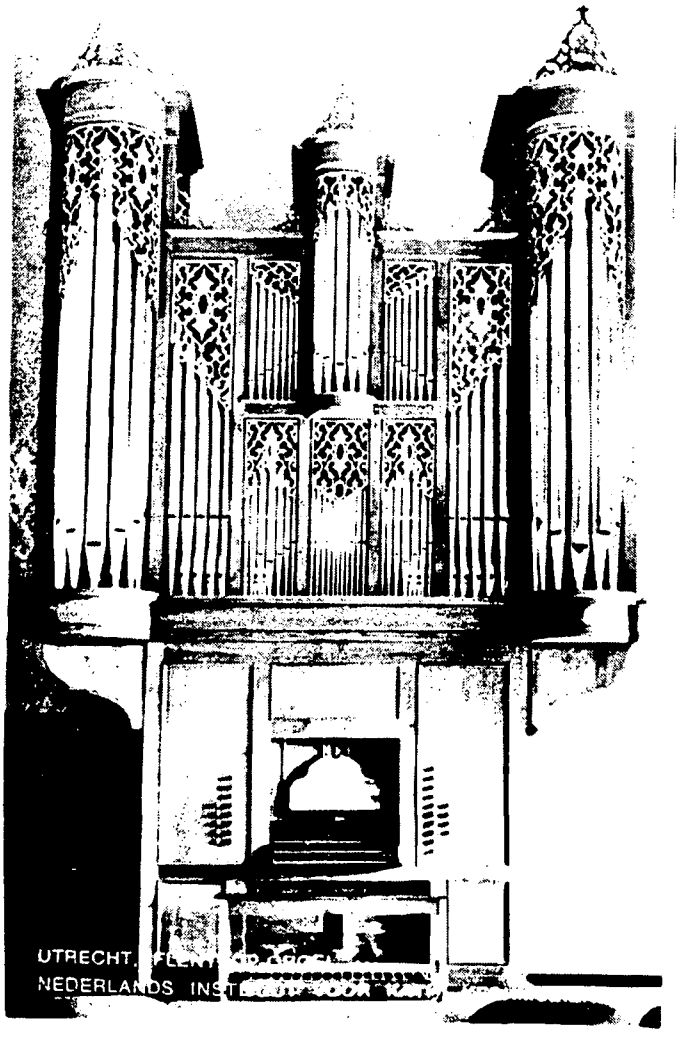


fig. 8. 6

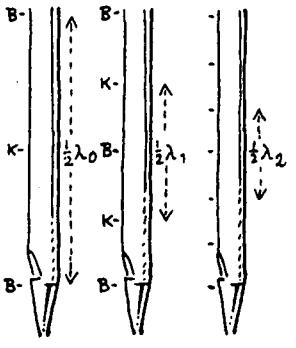


fig. 8. 5

Opdracht 8.5: Meet van een blokfluit de afstanden op die de mogelijke frequentie bepalen. Bereken de mogelijke (grond-)frequenties en probeer ze ook experimenteel te bepalen. Hoe is het twaalftallig toonstelsel in de blokfluit "ingebakken"?

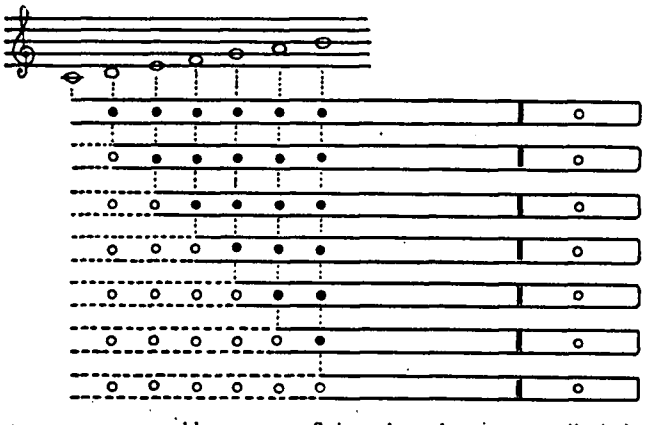


fig. 8.7

Het openen van een klep van een fluit verkort de met een vrij uiteinde trillende luchtkolom zodanig dat het vrije uiteinde bij deze geopende klep ontstaat.

Opdracht 8.6: Maak een konische buis of een afgeknotte konische buis (beide met open uiteinden) van bijvoorbeeld karton. Probeer met een toongenerator en een luidspreker op het gehoor de resonantiefrequenties te bepalen. Kloppen die met de theoretisch voorspelde waarden?

Opdracht 8.7: Bij welke stand van de schuif krijg je de hoogste toon?

Kruis aan:

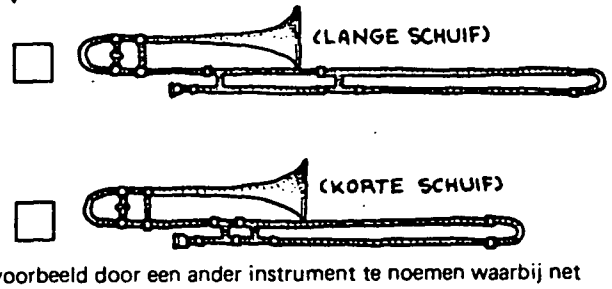
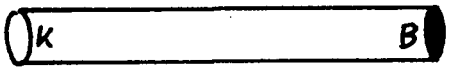


fig. 8.8

Licht je keuze toe (bijvoorbeeld door een ander instrument te noemen waarbij net zo iets gebeurt).

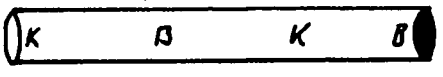
8.3 HALF-OPEN LUCHTKOLOM

Enkele blaasinstrumenten maken gebruik van een half-open luchtkolom: o.a. de gesloten orgelpijp. Omdat de opening bij het labium direkt met de buitenlucht in verbinding staat zal daar drukknoop optreden. De voorwaarden waaronder in een open luchtkolom resonantie optreedt zijn: een drukbuik aan het gesloten einde en een drukknoop aan het open einde (meestal niet precies aan de rand van een half-open pijp (zie fig.8.9), maar afhangend van de diameter van de buis een stukje er voor, l is dus een beetje groter dan de lengte van de buis).



grondtoon

fig. 8.9a



1e boventoon

fig. 8.9b

Omdat de afstand tussen knoop en buik $\frac{1}{4}$ golflengte is geldt voor de grondtoon f_o : $f_o = \frac{v}{4l}$
De eerste boventoon heeft een extra buik en knoop: dan past er $\frac{3}{4}$ golflengte op l: $f_1 = \frac{3v}{4l}$

8.6 Ga na dat de tweede boventoon een frequentie heeft van $f_2 = \frac{5v}{4l}$.
8.7 Bereken de frequentie voor de andere boventonen.

8.4 DE KONISCHE BUIS

Veel blaasinstrumenten eindigen in een soort toeter, zoals trompet. Deze vorm kan je vereenvoudigen tot een konische buis (fig.8.10). We zullen hier niet ingaan op de wiskundige achtergronden, maar de resonantiefrequenties van deze vorm komen overeen met de resonantiefrequenties van de open pijp, dus $f_o = \frac{v}{2l}$

en $f_1 = 2\, f_o$

$f_2 = 3\, f_o$ enz.

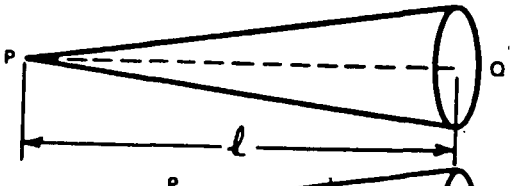


fig. 8.10

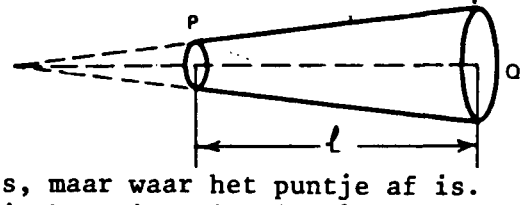


fig. 8.11

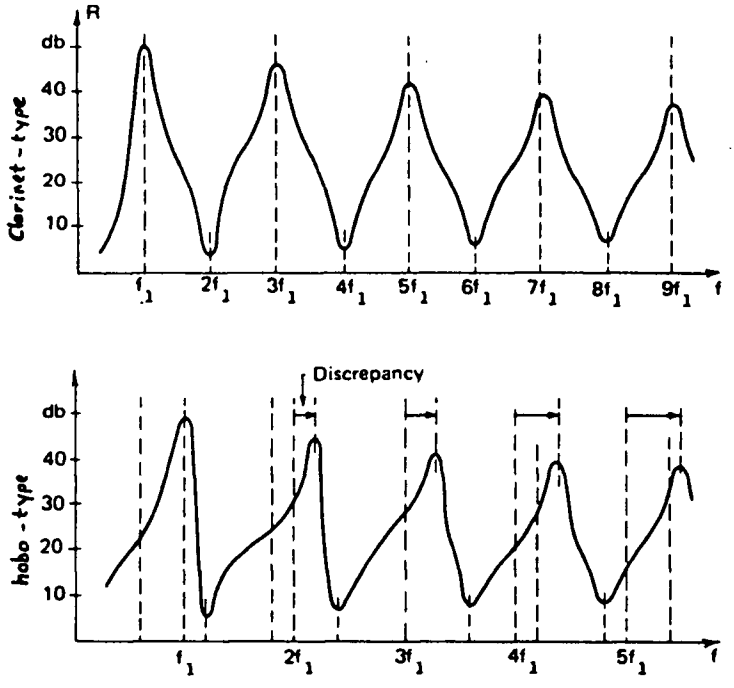
8.5 DE AFGEKNOTTE KONISCHE BUIS

De hobo is ook zo'n konische buis, maar waar het puntje af is. We noemen dit een afgeknotte konische buis. Zie fig. 8.11.

vervolg op blz. 61

De grondtoon en lagere boventonen liggen dicht bij de waarden voor de open buis (f_1, $2f_1$....) van dezelfde lengte maar hoe de hogere boventonen benaderen ze die van de gesloten buis, waar de even veelvouden van de grondtoon niet voorkomt. Zie fig. 8.12.

Deze figuren zijn verkregen door de resonanties van de hobo en de clarinet te meten (zonder mondstuk en met gesloten vingergaten).



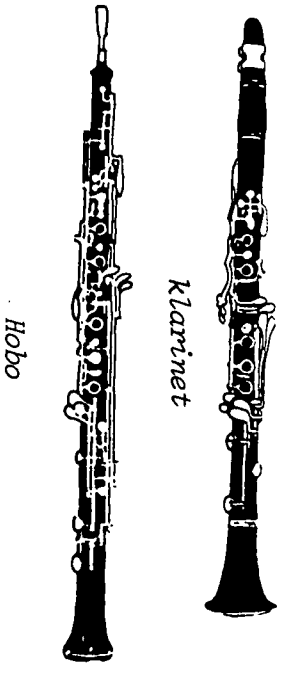


fig. 8.12

Bij open blaasinstrumenten worden in principe vier manieren om de toon te varieren gebruikt.
De eerste manier is die van het orgel: voor elke toon een aparte pijp.
De tweede manier is die van de trompet: door het inschakelen van extra lengten luchtkolom via de "pistons" kan de toonhoogte lager worden.
Zie fig. 8.13.

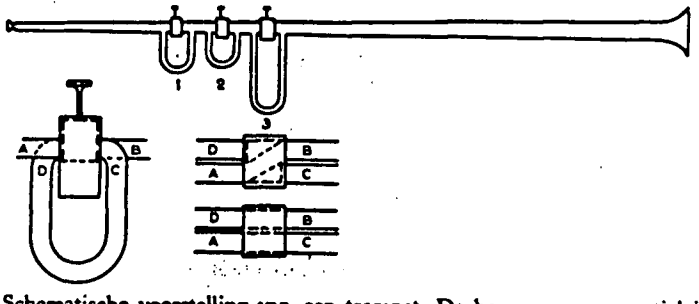


fig.8.13 Schematische voorstelling van een trompet. De bouw van een ventiel is in de afzonderlijke figuren aangegeven. In de ruststand laat het ventiel de zijbuis CD buiten werking en trilt de luchtkolom alleen in de hoofdbuis AB. Ingedrukt staat de buis A alleen via de buis DC met B in verbinding.

De derde manier is die van de trombone: door het uitschuiven van de trombone wordt de luchtkolom langer en de toon lager.
De vierde manier is die van de fluit. Door gaten open en dicht te doen wordt het aantal mogelijke resonantiefrequenties veranderd.
Een open verbinding met de buitenlucht betekent dat drukverhogingen meteen "weglekken" naar buiten toe: er zal daar een drukknoop ontstaan omdat de druk voortdurend gelijk is aan de druk van de buitenlucht.

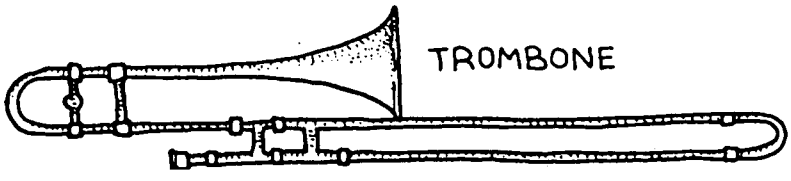


fig. 8.14

De toonopwekking.

Behalve de soort resonantiebuis ook wel resonator genoemd, is ook de wijze van toonopwekking van invloed op de klankkleur. De voornaamste soorten toonopwekking zijn:

1. door luchtwervelingen: bij de fluit en het orgel wordt lucht door een nauwe spleet geperst. Door luchtwervelingen ontstaan allerlei tonen (geruis) waarvan enkele versterkt worden omdat ze resonantietonen van het instrument zijn.
2. door tegen een rietje (bij klarinet) of tong (bij mondharmonica) aan te blazen die een beperkt aantal trillingen kan uitvoeren. Slechts de resonantietonen worden versterkt.

8.6 DE KLANKKLEUR VAN EEN BLAASINSTRUMENT.

Samenvattend kunnen we nagaan welke de voornaamste faktoren zijn die de klankkleur van een blaasinstrument bepalen:
- de mogelijke resonantiefrequenties van de luchtkolom
- de verhouding van de intensiteit van de verschillende resonantiefrequenties, onder andere bepaald door de diameter van de luchtkolom, de afmeting van openingen, de afwerking van het labrium (bij orgelpijp) e.d.
- de manier van toonopwekking

Verder zijn van invloed:
- Het materiaal waarvan het instrument gemaakt is: koper klinkt heel anders dan hout
- de vorm van het instrument: breed of smal, krom of recht.
- het dynamiekbereik van het instrument: harde tonen kunnen een andere klankkleur hebben dan zachte tonen van hetzelfde instrument
- de manier waarop het instrument aangeblazen wordt (hard of zacht, de stand van de lippen e.d.)
- de temperatuur van het instrument of van de lucht (deze is meestal alleen van invloed op de toonhoogte). Koudere lucht heeft een lagere geluidssnelheid en geeft dus andere tonen.
  De geluidssnelheid is evenredig met de wortel uit de absolute temperatuur.

8.8 Bij welke luchttemperatuur zal een pijporgel gestemd worden? En een fluit? Bereken de verhouding tussen de lengten van een orgelpijp en een fluit, als zij beiden dezelfde grondtoon voortbrengen.

8.9 Wat zal een organist in een (onverwarmde) kerk moeten doen om 's winters de zelfde muziek als 's zomers te krijgen?

8.10 Raakt de verhouding tussen de do-re-mi noten van een orgel in de war door temperatuurveranderingen of verschuiven de frequenties alleen?

Opdracht 8.8: Neem een dik touw van ongeveer 1,5 m lengte en laat het omlaag hangen.
Beweeg het bovenste eind een keer snel heen en weer.
Beschrijf wat er gebeurt.
Draai nu het boveneind in kleine cirkels snel rond, zodanig dat het touw resoneert. Probeer zo veel mogelijk resonantietoestanden in het touw te krijgen door sneller en langzamer te draaien.

Opdracht 8.9: Bouw de volgende opstelling.

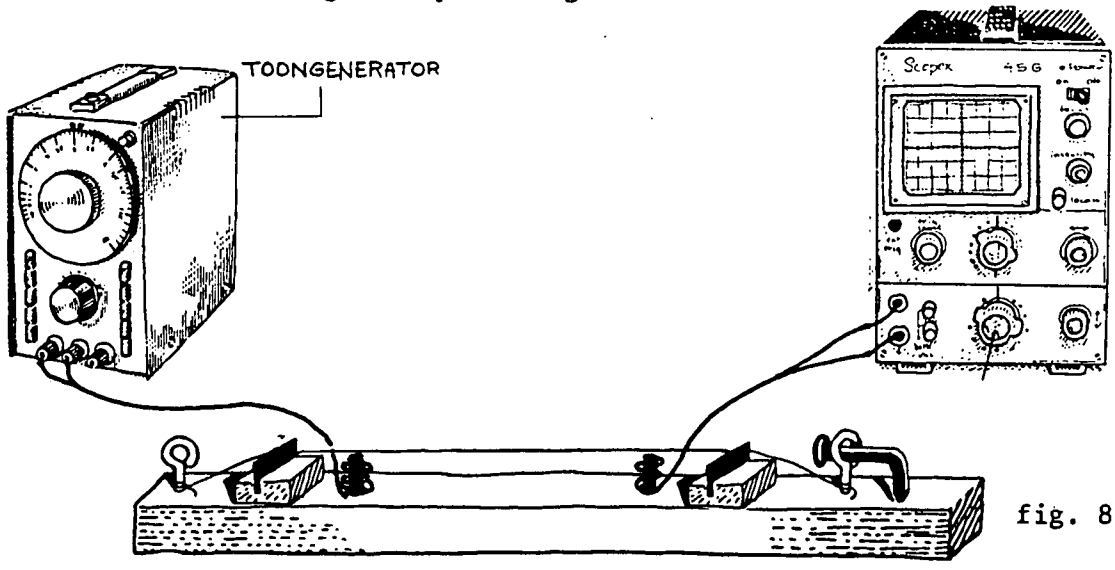


fig. 8.15

De metalen snaar, die op het plankje gespannen wordt, wordt in trilling gebracht met behulp van spoel 1 waarin een stukje weekijzer is geplaatst.
Op spoel 1 wordt met behulp van een toongenerator een wisselspanning aangesloten.
In spoel 2 is een permanente magneet geplaatst en hiermee wordt de trilling die de snaar uitvoert overgenomen en in een elektrisch signaal omgezet. Dit signaal wordt toegevoerd aan een oscilloscoop.
Het beeld op de skoop geeft informatie over de trillingstoestand van de snaar.
Onderzoek nu de resonantiefrequenties van de snaar als de toongenerator op sinus ingesteld is. Noteer de waarden. Probeer er regelmaat in te ontdekken.
Bekijk de snaar met een stroboskoop.

MUZIEKINSTRUMENTEN

8.7 RESONANTIE IN EEN SNAAR

Een snaar zit vast aan twee uiteinden. Die uiteinden kunnen dus niet bewegen, maar moeten stilstaan. Elke frequentie waarbij de trilling van de snaar aan die voorwaarde voldoet is een resonantiefrequentie van die snaar. De eenvoudigste resonantie is de resonantie waarbij de uiteinden stilstaan en het midden beweegt.

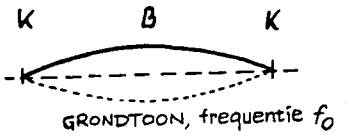


fig. 8.16

Aan de uiteinden, die stilstaan, bevinden zich de (snelheids)*knopen*en in het midden is de snelheidsbuik.
Omdat de afstand tussen twee opeenvolgende knopen een halve golflengte is krijgen we als de grondfrekwentie f_o:

$$f_o = \frac{v}{2l}$$

v is de snelheid waarmee een kleine uitwijking, die je de snaar geeft, heen en weer gaat bewegen. Je kunt dat vergelijken met een watergolfje dat zich uitbreidt over het water. De snelheden in de snaar zijn echter véél groter. Door een snaar strakker te spannen wordt de snelheid groter. Als je een zwaardere snaar neemt (van dezelfde lengte) wordt de snelheid kleiner.
Als je de trilling van een snaar bekijkt merk je dat de snaar niet elke willekeurige beweging kan uitvoeren. Dat komt vooral omdat het begin en het eind van de snaar vast zitten en dus niet kunnen bewegen.
Daardoor ziet de snaar er bijvoorbeeld zo uit (momentopname overdreven getekend):

fig. 8.17

of zo:

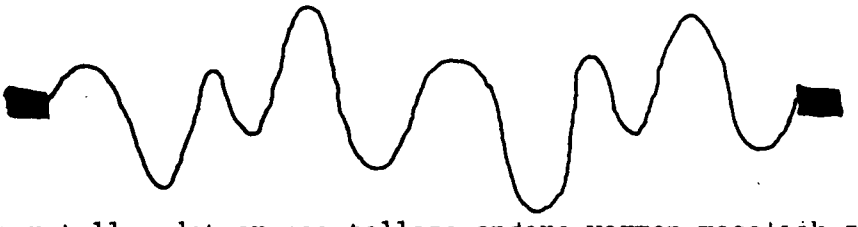


fig. 8.18

Je kunt je voorstellen dat er nog talloze andere vormen mogelijk zijn.
Je hebt er in opdracht 5.2 een paar gezien.
Wat zijn nu de meest eenvoudige trillingen van de snaar? Wiskundig kun je bewijzen dat elke beweging die de snaar kan uitvoeren kan worden opgevat als een kombinatie van een aantal eenvoudige trillingen die er zo uit zien:

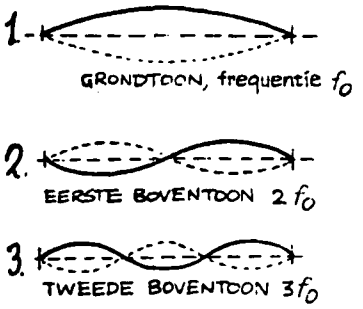


fig. 8.19
De snaar trilt heen en weer tussen de gestippelde en de getrokken positie.

Opdracht 8.10: Tokkel de snaar aan en bekijk hem met de stroboscoop. Houdt dan een stripje blik tegen één van de punten van de snaar die je in de vorige opdracht hebt gevonden. Wat zie je? Regel zonodig de frequentie van de stroboscoop bij. Schets de trillingswijze van de snaar in de diverse gevallen.
Maakt het uit als je de snaar op een ander punt aantokkelt?

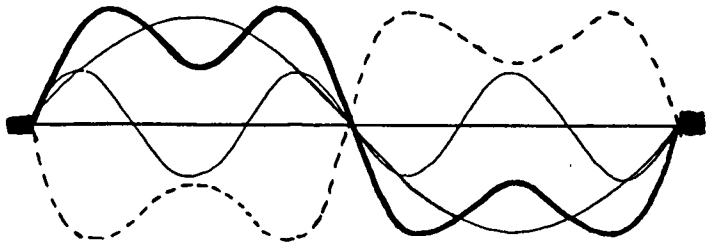
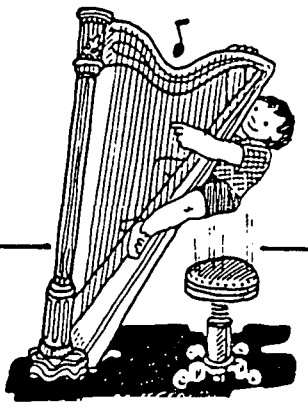


fig. 8.20 Door het stripje blik tegen het midden van de snaar te houden kunnen de 1e en 3e boventoon zich handhaven. De snaar trilt tussen de vette lijn en de onderbroken lijn. De beweging is de samengestelde van de bewegingen ten gevolge van de 1e en de 3e boventoon (dunne lijnen).

Opdracht 8.11: Schets de 4e en 5e trillingstoestand van de snaar. Kun je bedenken waarom bij een echte snaar de trillingen met "hogere" nummers steeds minder voorkomen, en de serie praktisch ophoudt bij een bepaald nummer?
Zijn er punten van de snaar die in de 2e trillingstoestand stilstaan? Zo ja, welke? en in de 1e en de 3e trillingstoestand?



8.11 Bepaal zelf de frequenties van de boventonen.

De toon die door een snaar, die in trilling wordt gebracht, wordt voortgebracht zal bestaan uit de grondtoon en de boventonen in een voor het instrument specifieke verhouding. De verhouding zal vooral beinvloed worden door de klankkast van het instrument, die voor de versterking van het geluid moet zorgen, en door het materiaal waarvan de klankkast is gemaakt.

8.8 VERSCHILLENDE TONEN MAKEN

Om een snaarinstrument de toon te laten voortbrengen die gewenst wordt zijn verschillende mogelijkheden. De eerste is voor elke toon een aparte snaar te stemmen. Dat is het geval in een piano en een harp. Een lagere toon betekent volgens de formule $f_o = \frac{v}{2l}$ een langere snaar (l groter) of een kleinere voortplantingssnelheid, waarover je verderop meer vindt.
Aan de toename van de snaarlengte ontlenen een harp en een vleugel hun karakteristieke vorm. De lengten van de snaren van een piano zijn zo gekozen dat alle halve en enkele tonen van iets meer dan 8 oktaven voortgebracht kunnen worden (totaal 88 tonen).
De tweede methode om de toonhoogte te varieren wordt o.a. toegepast bij de viool: de snaarlengte kan met de vinger worden ingekort tot op de lengte die de gewenste toon voortbrengt. Daartoe is de viool bespannen met 4 snaren van gelijke lengte, elk met een eigen voortplantingssnelheid.
De violist moet op zijn gevoel (en ervaring) zijn vinger op de juiste plaats zetten voor de verschillende tonen in een oktaaf. In principe kan hij ook alle tussenliggende tonen voortbrengen.
Op de hals van de gitaar zijn dwarsplaatjes aangebracht die zo geplaatst zijn dat alle tonen van enkele oktaven voortgebracht kunnen worden. Een gitaar heeft daarmee het 12-toonssysteem ingebouwd meegekregen.

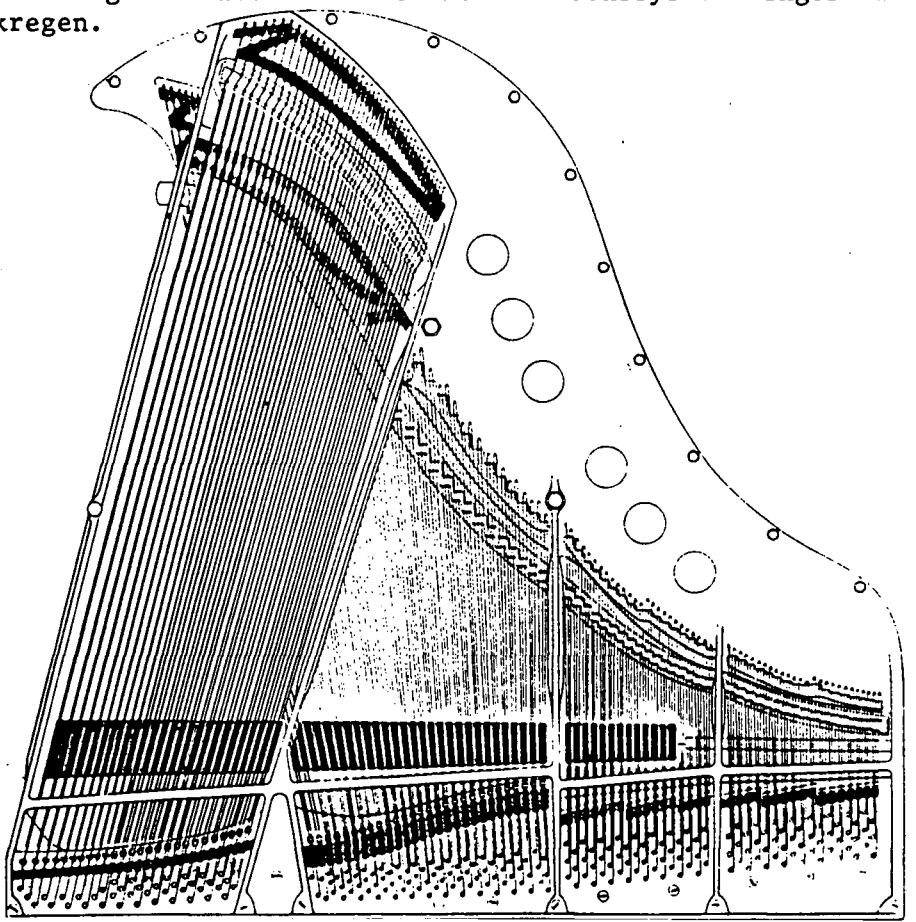


fig. 8.21

Opdracht 8.12: Gebruik dezelfde opstelling als in opdracht 8.9.
Stel de toongenerator in op een resonantiefrequentie en sluit de aan spoel 1 toegevoerde wisselspanning aan op de tweede y-ingang van de scoop.
Vergelijk de vorm van de aan spoel 1 toegevoerde wisselspanning met de vorm van de door de snaar veroorzaakte spanning.
Trek je conclusie.
Stel nu de toongenerator in op blokgolfproduktie en vergelijk weer de twee signalen.

Kun je uit de conclusie trekken dat de toon van een snaar opgebouwd is uit "sinus" tonen?

Opdracht 8.13: Bevestig een voorwerp waaraan zich een viltstift bevindt aan een veer.
Rek de veer extra uit en laat het voorwerp los, zodat het op en neer trilt.
Beweeg nu een stuk papier met constante snelheid in de aangegeven richting, zodat de uitwijking van de trilling als functie van de tijd wordt geregistreerd.
Welke vorm heeft het geschreven patroon?
Beweeg een trillende stemvork met de benen langs een beroete plaat. Welke vorm heeft het geschreven patroon?

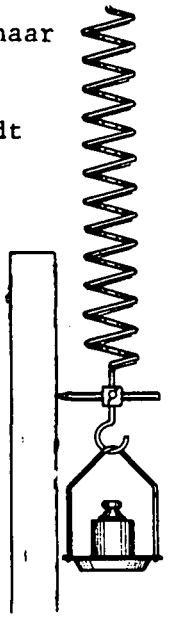
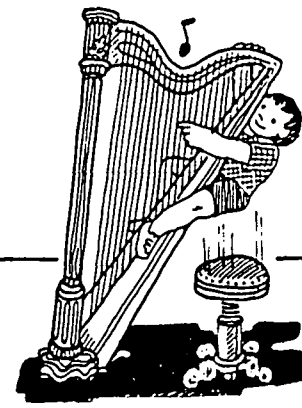


fig. 8.22

Opdracht 8.14: Houdt een plankje met de snaar vrij in de lucht en tokkel de snaar aan.
Plaats het plankje op tafel en tokkel weer.
Vergelijk de klankkleuren met zuivere tonen.
Schroef de plank met de snaar vast aan één of ander hol voorwerp, bijvoorbeeld een stuk PVC-pijp. Tokkel weer op de snaar en vergelijk de klankkleur met de tonen van proef 8.9.
Op welke manieren zal resonantie in de klankkast van een gitaar een bijdrage leveren aan de klankkleur van het instrument?



MUZIEKINSTRUMENTEN

8.9 HET STEMMEN VAN EEN SNAAR

Een snaar kan gestemd worden door de lengte te veranderen. Maar de maximale lengte van een snaar is meestal een gegeven die niet eenvoudig te veranderen is. In de praktijk wordt de snaar gestemd door de *spanning* van de snaar te veranderen.

Zoals uit de formule voor de grondtoon blijkt $f_o = \frac{v}{2l}$ kan de frequentie beinvloed worden door de voortplantingssnelheid in de snaar. Die voortplantingssnelheid hangt van twee grootheden af: de *spankracht* F in de snaar en de *massa per lengte* van de snaar. Een strakkere gespannen snaar geeft een hogere toon. Daaraan zie je dat de frequentie, en dus de voortplantingssnelheid, toeneemt als de spankracht groter gemaakt wordt.
Een zware snaar, bijvoorbeeld de met koperdraad omwonden snaren van een piano, brengt een lagere toon voort dan een even lange snaar met minder massa per lengte. De voortplantingssnelheid neemt dus af bij grotere waarden voor de massa per lengte.
In formulevorm is de samenhang tussen voortplantingssnelheid v, spankracht F_s en massa per lengte m/l :

$$v = \sqrt{\frac{F_s}{m/l}}$$

8.12 Ga na dat $\frac{F_s}{m/l}$ *de eenheid van snelheid heeft. Je moet daarbij gebruik maken van:* $1\ N = 1\ kg.m/s^2$.

Door de spankrachten die op de snaren werken moeten de snaarinstrumenten heel stevig zijn, de piano met zijn 88 tonen (de hoge tonen met 3 snaren, middel- en lage tonen met 2 snaren en de allerlaagste tonen met één snaar) wel het meest. Op het gietijzeren frame van een piano kan wel 2.10^5 N werken.

8.10 DE TOONAANZET

Een snaar die wordt aangeslagen of getokkeld kan in het begin scherper klinken dan na enige tijd. Dat komt omdat er in de klank niet alleen harmonische componenten zitten, maar ook niet-harmonische componenten, die sneller uitsterven dan de harmonische componenten, omdat ze geen resonantie frequenties van de snaar zijn.
Vooral als de snaar een grote uitwijking meekrijgt bij het aanslaan of tokkelen komen deze niet-harmonische veel voor. De reden daarvan ligt in het gedrag van de snaar bij grote uitwijkingen.
Een snaar die een weinig uit zijn evenwichtsstand gehaald wordt, ondervindt dientengevolge een kracht F die naar de evenwichtsstand toe is gericht.

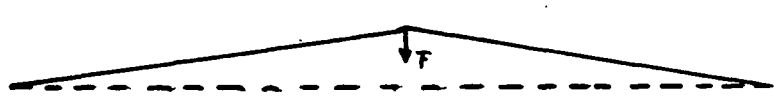


fig. 8.23

Voor kleine uitwijkingen gaat de wet van Hooke op: de kracht is evenredig met de grootte van de uitwijking. In formule-vorm:

$$F = -c\,.u$$

Opdracht 8.15: Probeer op een monochord een toon te maken van 500 Hz (grondtoon).
Pak dat theoretisch aan met de formule

$$v = \sqrt{\frac{Fs}{m/l}}$$

Zoek een geschikte snaar en geef die de juiste spanning en lengte. Controleer of je verwachting uitkomt.

Opdracht 8.16: De krachten op een gitaar.
Neem een gitaar en enkele losse gitaarsnaren van verschillende dikte. Bepaal de massa per lengte van de gitaarsnaren en de lengte waarmee de snaren op de gitaar trillen.
Bepaal de grondtoon van de snaren.
Bepaal uit de grondtoon de gewenste voorplantingssnelheid van de gitaarsnaren.
Bepaal uit de voortplantingssnelheid de spankrachten.
Hoe groot is de totale spankracht op de gitaar?
Extra:
Hoe groot is de kracht van de kam op dat bovenblad van de klankkast ten gevolge van de snaren? Hoe bereken je die kracht?

Opdracht 8.17: Neem een losse, dunste draad van een gitaar en bepaal de massa per lengte.
Bepaal de grondtoon van de dikste snaar op de gitaar.
Bereken hoe lang die snaar moest zijn als de snaar van het dunne draad gemaakt was.

Opdracht 8.18: Zoek uit deel 1 de frequenties op van de toonladder die hoort bij één van de gitaarsnaren.
Bereken daaruit de lengten die de snaar moet kunnen krijgen.
Controleer je berekeningen door de lengten op de gitaar te meten.

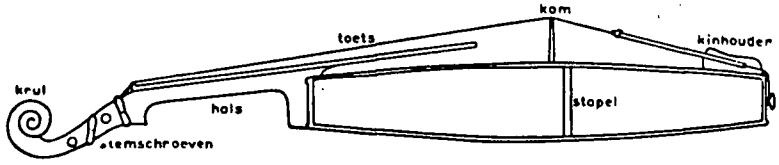


fig. 8.24 Doorsnede van een viool.

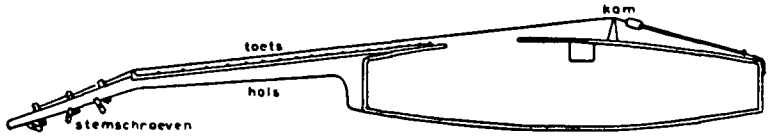
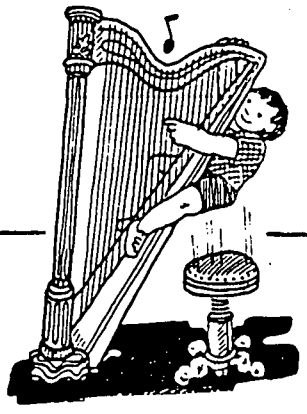


fig. 8.25 Doorsnede van een gitaar.



C is een evenredigheidsconstante, de min geeft aan dat F en u een tegengestelde richting hebben met natuurkundige relaties ($F = m\,a$ en $a = \frac{d^2u}{dt^2}$) en een stuk wiskunde (differentiaal en integraal rekening) die je allemaal later nog krijgt kun je bewijzen dat dit tot gevolg heeft dat de snaar een sinusvormige trilling gaat uitvoeren. Let wel dat dat alleen opgaat als de uitwijking klein is en als de snaar zich als geheel sinusvormig beweegt, niet alleen het ene, aangeslagen punt.
Bij grotere uitwijkingen gaat de snaar zich niet-sinusvormig bewegen zodat er niet-harmonische componenten inkomen, die als scherpe tonen te horen zijn.

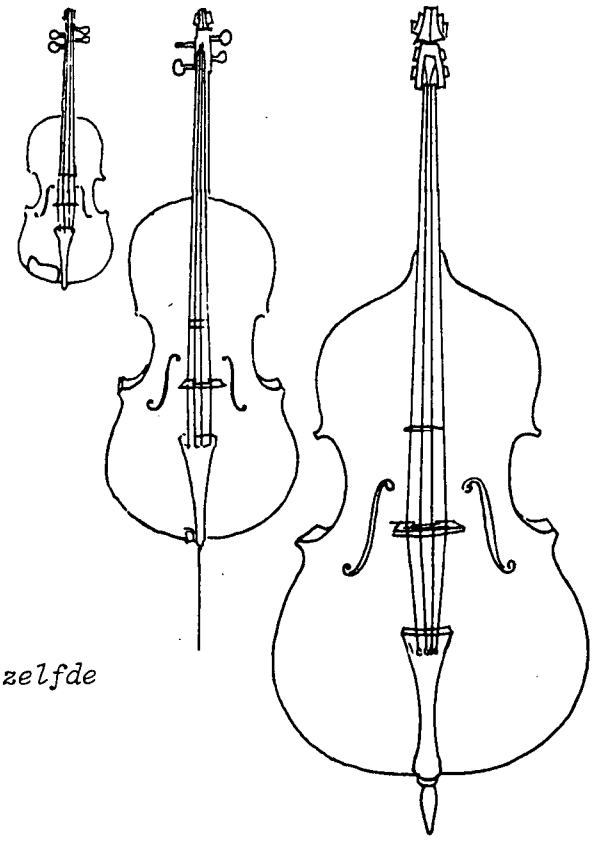
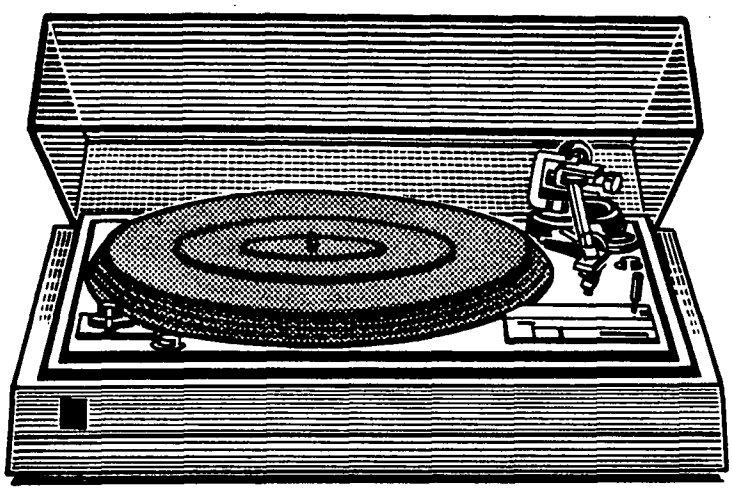


fig. 8.26
viool, cello en contrabas op dezelfde schaal getekend.

9 ELEKTRISCHE BEWERKINGEN VAN MUZIEK



Halfautomatische snaaraangedreven platenspeler en 2 snelheden. Regelbare snelheid ± 6%
Voorzien van ULM toonarm techniek en verstelbare schokabsorberende voeten.
Inkl. TKD-49 S MD-element.
Afm.: 44x14x37 cm.
Metallic en zwarte uitvoering.

ADVIESPRIJS 329,-

fig. 9.1

9.1 INLEIDING

Het komt niet zo vaak voor dat je kunt genieten van een life-optreden van een zanger of (pop-)groep. Meestal hoor je de muziek voor een band of een plaat, die dan ook nog via de radio uitgezonden wordt. Het is natuurlijk het prettigst als je de muziek zo natuurgetrouw mogelijk te horen krijgt; het moet als het ware net zijn alsof de musici bij je in de kamer zitten te musiceren. HI-FI (high fidelity) noemen de vaklui dat. Omdat zo'n term op zich natuurlijk niets betekent, hebben de fabrikanten van geluidsapparatuur voor die natuurgetrouwheid bepaalde eisen afgesproken en die zie je wel eens als "beantwoordt aan de norm Din 45000" in boekjes waarin geluidsapparatuur besproken wordt.
In dit gedeelte zullen we proberen te ontdekken welke faktoren de natuurgetrouwheid van een muziekstuk beinvloeden bij de elektrische weergave ervan.

9.2 RUIS

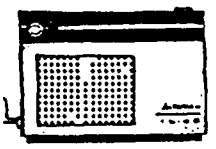
Ruis is een verschijnsel dat je het best kunt horen als je je radio eens tussen twee stations afstelt. Je hoort een geluid waarin zo'n beetje alle frequenties voorkomen.
Zo'n ruis hoor je ook, zij het in veel mindere mate, als je de volumeknop van je geluidsinstallatie ver open draait, terwijl je er geen "geluidsbron" (tuner, platenspeler of cassettedeck) op hebt aangesloten.

Meestal hebben we weinig last van ruis, omdat deze vaak overstemt wordt door het geluid dat we willen horen. Ruis gaat pas een rol spelen als de sterkte ervan toeneemt of als de sterkte van het te beluisteren geluid afneemt.
De mate waarin we last hebben van de ruis kunnen we aangeven met de zogenaamde signaal-ruis-verhouding, dit is de verhouding tussen het totale (geluids-)vermogen en het ruisvermogen, gemeten over het hele frequentiegebied.

fig. 9.2 RUIS

We kunnen ruis (ruwweg) verdelen in drie soorten:
1. veroorzaakt door de bron (plaat, band)
2. veroorzaakt door de verwerkende apparatuur (versterker)
3. veroorzaakt door het kommunikatiekanaal (atmosfeer bij de radio, kabel bij de kabel tv).

1. De ruis bij een grammofoonplaat wordt veroorzaakt door de korreligheid van het plaatmateriaal, dat wil zeggen: de grootte van de (kristal-)korrels van de plaat. Ook de ruis van een (magneet)band heeft te maken met de grootte van de korrel en de magnetiseerbaarheid van die korrel een rol speelt.
   De moderne recorders zijn uitgerust met een ruisonderdrukker, ook wel aangegeven met het Dolby-systeem. Bij de opname wordt dan het signaal meer versterkt naarmate het zwakker is; de dynamiek wordt gecomprimeerd. Bij de weergave wordt precies de omgekeerde bewerking toegepast (expansie). Een dergelijke combinatie wordt ook wel compansie genoemd. Het resultaat is dat zwakke geluiden bij opname verder boven het ruisniveau van de band uitstijgen. Bij weergave blijft deze afstand bestaan; de bandruis wordt echter evenveel verzwakt als het signaal. Deze winst aan dynamiek wordt betaald met een zekere vertekening van het geluid; het wordt als het ware iets korreliger. Vandaar dat men in de betere (duurdere) systemen de compansie zoveel mogelijk tracht te beperken tot de hogere frequenties waar de ruis het meeste stoort.



DOLBY SYSTEM *

fig. 9.3 *Het 'dubbel-D-systeem' en 'Dolby' zijn geregistreerde merknamen van de firma Dolby Laboratories Inc.*

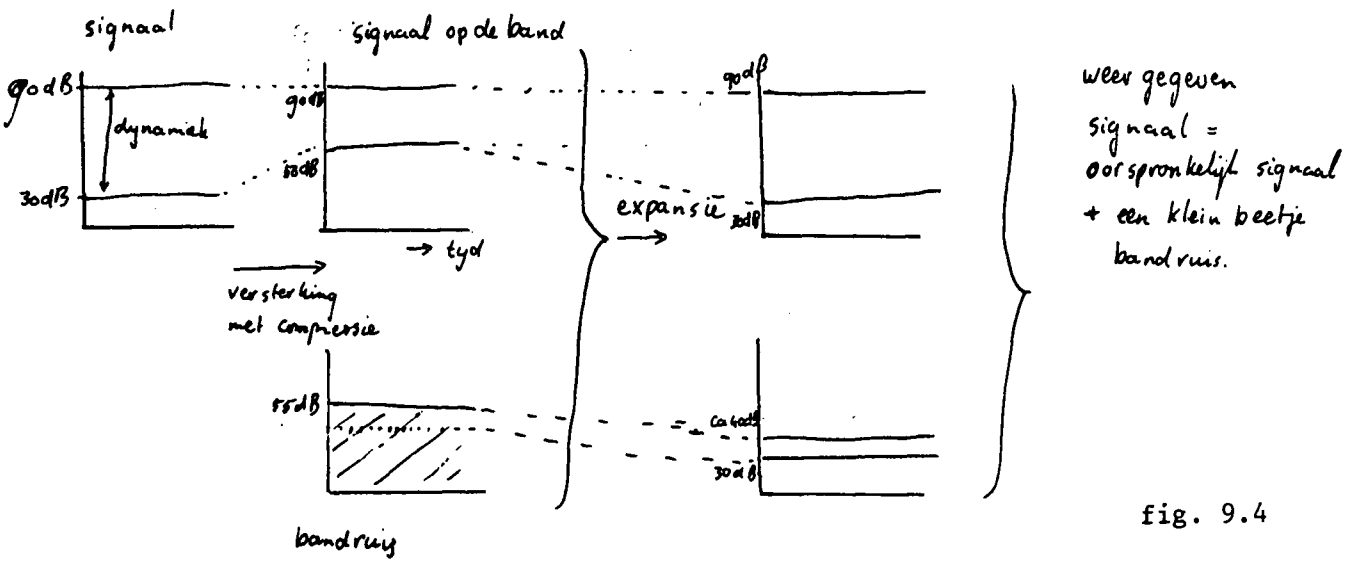


fig. 9.4

2. De ruis in de verwerkende apparatuur, zoals de versterker, wordt vooral veroorzaakt door de beweging die elektronen uitvoeren in de elektronische componenten waaruit de versterker is opgebouwd. Die beweging van de elektronen is de beweging van de atomen en elektronen tengevolge van de temperatuur. Elektronen die onder invloed van een elektrische spanning bewegen kunnen daardoor van hun route "afwijken". Daardoor is bijvoorbeeld de weerstand in de versterker niet op elk moment de zelfde. Daardoor ontstaan er kleine veranderingen in de stroom wat als variaties in het geluid te horen is: de ruis.
   De mate waarin versterkers ruis veroorzaken kan men uitdrukken in het *ruisgetal*, de verhouding tussen de signaal-ruis-verhoudingen voor en na de versterker.

3. De ruis veroorzaakt atmosfeer, wordt ook wel eens antenneruis genoemd. Een belangrijk deel van deze ruis is afkomstig van de zon.
   De invloed van deze ruis is duidelijk te merken als je luistert naar Hilversum 1 op respektievelijk de A.M. of de F.M. Het radiosignaal dat via de AM-band wordt uitgezonden heeft veel meer last van atmosferische storingen dan die via de FM-band worden uitgezonden. Je kunt dat vooral ook merken aan het verschil in ruis tussen radiostations op AM en op FM.

ELEKTRISCHE BEWERKINGEN VAN MUZIEK - OPDRACHTEN

Opdracht 9.1: Hoe "ziet" ruis eruit?

- Sluit de luidspreker van een geluidsinstallatie aan op een oscilloscoop
- bekijk het signaal als
  . je de tuner op AM afstemt tussen twee stations
  . je de tuner op AM afstemt op een station
  . je de tuner uit en de versterker de volumeknop ver opendraait

Opdracht 9.2: Maskering van geluid.

Ruis hoor je vaak niet, omdat de muziek de ruis als het ware overstemt.
Pas als je de volumeknop wat lager zet kan ruis storend worden.
Het verschijnsel dat een geluidsbron een andere geluidsbron kan overstemmen zodat je het niet meer hoort, noemen we maskering van geluid.

- Sluit een toongenerator met een frequentie van 400 Hz aan op de linker luidspreker van een koptelefoon; stel de sterkte van het geluid zo in dat je het nog net kunt horen.
- Sluit een andere toongenerator aan op de rechter luidspreker van de koptelefoon.
- Bepaal bij minstens 10 frequenties de sterkte van het geluid als je de toon van 400 Hz niet meer hoort.
- Bepaal bij elke frequentie de verhouding tussen de sterkte van beide signalen en maak een grafiek van deze verhouding tegen de frequentie.
- Trek je conclusie.

Opdracht 9.3: Ruisonderdrukking.

Probeer aan een bandrecorder te komen die voorzien is van een (uitschakelbare) ruisonderdrukker.
Zoek op de radio een zender op met redelijk veel ruis of een (slechte) plaat met veel ruis.
Maak een band-opname met en zonder gebruik te maken van de ruisonderdrukker.
Beluister beide opnamen en probeer de verschillen te omschrijven in termen van ruis, dynamiek, hoge en lage tonen.

9.3 VERVORMING

Afwijkingen tussen de oorspronkelijke muziek en de weergegeven muziek worden vervormingen genoemd. Het oor is, vooral na enige oefening, erg gevoelig voor vervorming. Daarom stellen muziekliefhebbers hoge eisen aan muziekapparatuur, banden en platen.
Voor het vastleggen van muziek heb je een *drager* nodig. Dat kan een band of grammofoonplaat zijn. Tijdsverschillen worden daarbij omgezet in afstandverschillen op de band of de plaat.
Op elke stap van de weg die doorlopen wordt van opname naar weergave kan vervorming optreden. Die stappen kunnen zijn:

1. de muziek wordt in de microfoon omgezet in elektrische signalen
2. deze elektrische signalen worden versterkt
3. de signalen worden geschikt gemaakt om vastgelegd te worden op magneetband of plaat, dus worden omgezet in verschillen in magnetisch veld of bewegingen van een naald die een plaat bekrast
4. het signaal wordt vastgelegd op het gevoelige materiaal
5. het gevoelige materiaal wordt afgetast; magneetkop of naald
6. het verkregen signaal wordt versterkt
7. het elektrische signaal brengt een luidspreker in trilling.

Bij de weergave van het geluid kunnen er verschillen zijn door faseverschuiving, veranderingen in dynamiek, veranderingen in frequenties en in de onderlinge verhouding tussen de frequenties.

Een belangrijk soort vervorming is de harmonische vervorming. Hierbij komt het erop neer dat door het betreffende apparaat aan een zuivere toon (sinus) van zekere frequentie extra tonen worden toegevoegd waarvan de frequentie veelvouden zijn van die frequentie van het oorspronkelijke signaal.
Die extra tonen heten harmonischen. Veel muziekinstrumenten produceren deze tonen al van nature; daarom is deze vervorming niet zo storend hoewel de klankkleur bij weergave beinvloed wordt.
Het kan ook gebeuren dat er niet-harmonische tonen worden toegevoegd. Tonen kunnen dan vals gaan klinken.
De harmonische vervorming van een apparaat kan in procenten worden opgegeven. De betekenis van dat getal is, dat de variaties van de toegevoegde harmonische tonen zoveel procent is van de geluidsdruk van het oorspronkelijke geluid voordat die vervorming eraan was toegevoegd. Als proeftoon gebruikt men meestal een zuivere (sinus)toon.
We noemen deze waarde de *THD, total harmonic distorsion*. De harmonische vervorming is dus: $P_{THD}/P_{sinus} \times 100$ %.
Een THD-waarde van 1% betekent omgekeerd $P_{THD} = 0{,}01\ P_{sinus}$ en voor de intensiteit $I_{THD} = (0{,}01)^2\ I_{sinus}$; een faktor 10.000 oftewel 40 dB!
Deze waarde is vrij klein en niet storend. Pas bij een waarde van 3% wordt de harmonische vervorming storend.

9.1 Ga na dat dit overeenkomt met een vervorming van ongeveer 50 dB.

9.4 HOE ONTSTAAT VERVORMING?

Vervorming kan verschillende oorzaken hebben. Een daarvan kan de beperkte informatiecapaciteit van de plaat of band zijn.
Als voorbeeld kijken we naar de weergaven van een toon van 10000 Hz op een grammofoonplaat. Stel dat deze toon 1 sekonde duurt. Bij een plaat bewegen de buitenste groeven zich met een snelheid van ca. 0,5 m/s.
Ga na of dat een LP of een 45-toerenplaatje is.
Op een lengte van 50 cm moeten dat 1000 trillingen worden vastgelegd, hetgeen overeenkomt met een beschikbare lengte van 50 um per trilling. Wil deze toon nog goed worden weergegeven, dan moet de korrel- en kristalstruktuur van het plaatmateriaal natuurlijk veel kleiner zijn dan 50 um. In de praktijk is een toon van 1000 Hz, zeker voor de kortere binnengroeven, wel ongeveer het maximum voor de geluidsregistratie op plaat.
Ook de lage tonen komen, vooral door grote afstand op de plaat, moeilijk over. Verder stelt de maximale diepte en breedte van de groeven beperkingen aan de maximale bereikbare dynamiek. De beste plaat staat een dynamiek van maximaal 60 dB toe.
Voor een uitmuntende weergave van muziek is vereist een frequentiebereik van 10 tot 40.000 Hz en een dynamiek van 60 - 100 dB.
Het dynamiekprobleem wordt opgelost door de versterking van de sterkste tonen te verminderen en die van de zwakste te vermeerderen. We noemen dit dan dynamiekcompressie.
Een ideale geluidsinstallatie moet een groter frequentiegebied omvatten dan die die het oor kan waarnemen. Een toon van 10.000 Hz geeft met een (niet-hoorbare) toon van 25.000 Hz een verschiltoon van 15.000 Hz. Die toon zou ontbreken als de toon van 25.000 Hz niet aanwezig zou zijn.
Een tweede oorzaak van vervorming kan in de versterker liggen. In een versterker worden wisselspanningen die afkomstig van platenspeler of bandrecorder versterkt.
Een sinustoon met een amplitude van 0,25 V van een cassetterecorder wordt in een normale versterker van 1 tot maximaal 50 keer versterkt, afhankelijk van de stand van de volumeknop.
De versterker zorgt er ook voor dat er voldoende stroom door de luidsprekers kan gaan lopen; daarvoor wordt energie opgenomen uit het lichtnet en in de transistoren bij het geluidssignaal gevoegd.
Meestal wordt door die transistoren de onderste en bovenste helft van het signaal apart versterkt en later weer bij elkaar gevoegd.
Het kan gebeuren dat het splitsen en weer samenvoegen dan ontstaat er zogenaamde cross-over-vervorming.

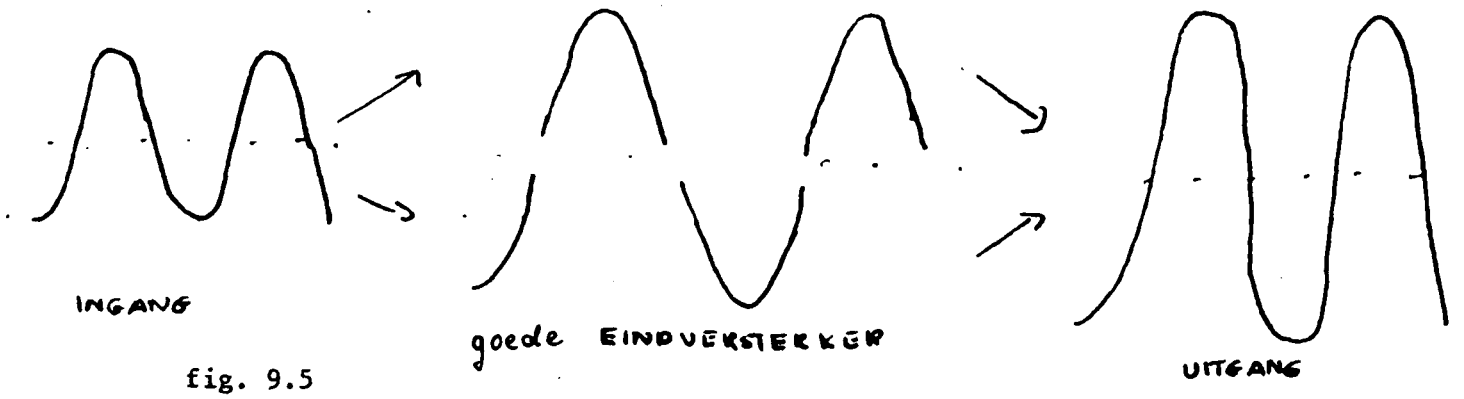
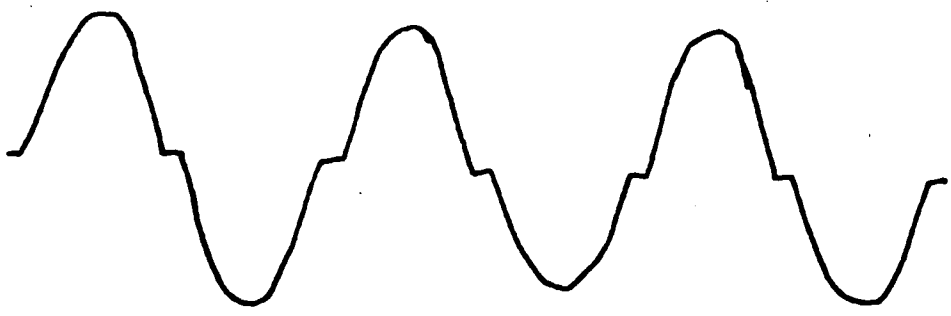


fig. 9.5



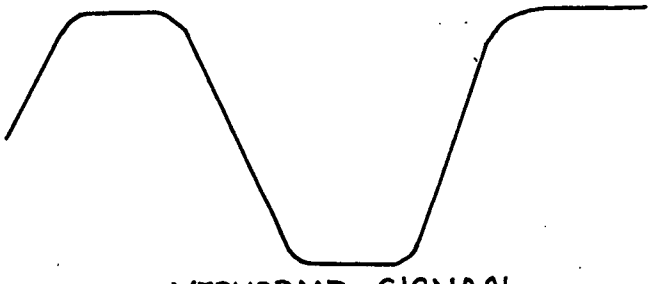
slechte versterker: Cross-over vervorming

fig. 9.6

Het kan ook gebeuren dat de transistoren de versterking van het signaal niet aan kunnen, doordat bijvoorbeeld het ingangssignaal te groot is voor de betreffende ingang. We noemen dit oversturing.
Het uitgangssignaal wordt dan als het ware afgetopt.
De vervorming, van welke soort dan ook, is sterk frequentieafhankelijk.

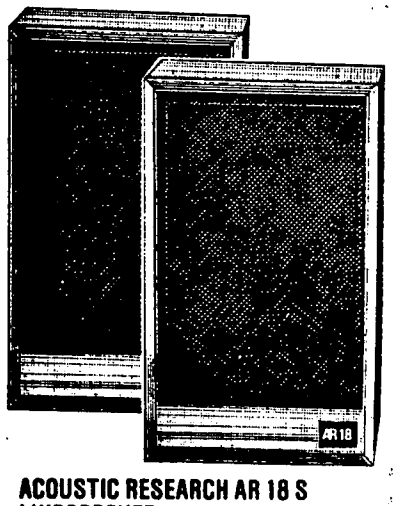
Waarschuwing.

Je moet wel een heel slechte versterker hebben als je last hebt van bijvoorbeeld cross-over-vervorming. De belangrijkste bron van vervorming bij een stereo installatie zijn de geluidsboxen. Het is vaak beter een niet zo goede stereo installatie te kopen met redelijke boxen (vaak toch al duur) dan een zeer dure installatie met goedkope, slechte kwaliteit boxen waardoor het geluid toch nog slecht is.



VERVORMD SIGNAAL
(oversturing en 'clipping')

fig. 9.7



ACOUSTIC RESEARCH AR 18 S LUIDSPREKER
Twee-weg boekenplank luidspreker met vloeistof gekoelde tweeter voor een groot belastbaar vermogen. Ondanks geringe afmetingen uitstekende specificaties zoals een frequentiebereik van 62-22.000 Hz. Geschikt voor versterkers van 15 tot 50 Watt kontinu. Noten uitvoering.

Opdracht 9.4: Hoeveel vervorming kun je nog net horen?

We kunnen vervorming nabootsen door één extra toon samen met een bepaalde toon uit één luidspreker te laten komen.
We gebruiken twee toongeneratoren; stel de ene af op 1 kHz en de andere op 2 kHz zodat je één mooie toon hoort.
Zet de dB(A)-meter vlak bij de luidspreker en stel de eerste toon af op 90 dB(A). Door nu langzaam van nul af de tweede toon bij te mengen kun je bepalen wanneer dit net hoorbaar wordt.
Zet de eerste toon nu af en meet het geluidsniveau van de tweede.
- Hoe groot is het verschil in geluidsniveau
- Hoeveel maal sterker is de eerste toon in intensiteit?
- Hoeveel bedraagt de juist hoorbare vervorming in procenten?

Herhaal de proef voor een extra toon van 3 kHz in plaats van 2 kHz.
- Hoor je deze vervorming eerder?

Opdracht 9.5: Neem een zeer slechte simpele eigengemaakte versterker.
Bekijk het beeld van een versterkte sinusspanning op de skoop en ga na of er van cross-over vervorming sprake is.
Zo ja, ga dan na:
- hoe je dat hoort;
- waarom je die vervorming het sterkst hoort als de versterker zacht staat.

Doe het zelfde voor een goede kwaliteit versterker.
Gebruik de koptelefoon uitgang.

Opdracht 9.6: Cross-over vervorming kan je nabootsen door een versterker aan te sluiten op een klein, oud luidsprekertje.
Beluister het geluid en bekijk het beeld op de oscilloscoop.

10 KEUZEONDERZOEK MUZIEKINSTRUMENTEN

Het is de bedoeling dat je een muziekinstrument gaat doorlichten met betrekking tot de factoren die een bijdrage leveren aan de klank in de breedste zin van het woord. Facetten van de klank van een toon zijn bijvoorbeeld de aanzet van de toon, de sterkte, de klankkleur, de nagalmtijd etc.

Om je een beetje richting te geven bij het werk volgen nu een aantal aanwijzingen.
Het onderwerp valt uiteen in twee delen:
A. Literatuuronderzoek.
B. Het doen van een aantal proefjes met en praktische onderzoekjes aan het instrument.

In verband met de beperkte tijd die voor het onderwerp beschikbaar is, zul je een taakverdeling moeten maken.
Het literatuuronderzoek zal uitmonden in een beschrijving van belang zijnde onderdelen en hun functie. Pas ervoor op dat je niet in een gedetailleerde technische beschrijving vervalt van bijvoorbeeld overbrengingsmechanismen.
Behandel bijvoorbeeld de volgende vragen:
- welk onderdeel is trillingsbron?
- welk onderdeel is resonator?
- op welke manier wordt de snaar in trilling gebracht? Wat is het gevolg van deze manier voor de klank?
- hoe wordt de lucht in trilling gebracht?
- waar vindt de overdracht van trillingsenergie naar de lucht plaats?
- waar en hoe wordt de klank versterkt?
- welke onderdelen hebben invloed op de klankkleur?

Muziekinstrumenten kunnen in twee categorieën verdeeld worden, nl. snaarinstrumenten en blaasinstrumenten.
Voor beide soorten geven we een aantal voorbeelden van mogelijke proefjes en onderzoekjes.

Snaarinstrumenten:

- Zorg ervoor dat een lage toon snaarvrij kan bewegen (eventueel de demper optillen).
  Laat dan kortstondig en hard hogere tonen klinken en luister of de lage toonsnaar resoneert of niet.
  Laat ook kort en hard een akkoord klinken.
- Maak een snaar vrij van de hoge tonen en laat dan kort en hard lage tonen klinken. Beluister weer het eventuele overblijvende geluid.
- Sla een prettig klinkend akkoord aan in de hoge tonen en sla hetzelfde akkoord aan in de lage tonen.
  Vergelijk de klankindruk van de twee akkoorden.
- Onderzoek de nagalmtijd als functie van de frequentie.
- Onderzoek welke invloed de hoek tussen de strijkstok en de snaar heeft op de klankkleur.
- Heeft de plaats waar de snaar wordt aangeslagen invloed op de klankkleur?
- Maak de trillingswijze van een aangestreken snaar zichtbaar op de skoop.
- Laat boventonen horen (flageolet).
- Maak de resonantietoestanden van de onderkant van een klankkast zichtbaar met behulp van fijn poeder.

Blaasinstrumenten:

- Maak zelf een orgelpijp van hout en onderzoek de invloed van kernsteken op de klank.
- Onderzoek de invloed van de geluidssterkte van een toon op de klankkleur met behulp van de frequentie-analyser.
- Welke invloed heeft een glas voor de kelk van een koper blaasinstrument?
- Onderzoek het verschil tussen open eind/gesloten eind (orgelpijp).
- Klinkt een blokfluit met alle zijopeningen gesloten en een open einde nog?
  Hoe is het als ook het eind gesloten wordt?
- Welke grootte heeft de grootte van de zijopeningen (blokfluit) op de toonhoogte?

In het verslag van de proefjes of bij de demonstratie probeer je een verklaring te geven van de gevonden verschijnselen.

Saxofoon

11 KEUZEONDERZOEK GELUIDSINSTALLATIES

Als er één markt is waar vernieuwingen en verbeteringen aan de orde van de dag zijn, dan is het wel de HI-FI-markt.
Elke zichzelf respekterende fabrikant van dat soort apparaten brengt minstens twee maal per jaar een "nieuwe lijn in HI-FI" op de markt. Aan dit soort apparaten voor thuis wordt veel geld besteed; een stereo-installatie die uit diverse componenten bestaat kost al gauw een paar duizend gulden. Professionele apparaten kunnen zo duur zijn, dat bijv. de luidsprekerboxen per stuk al tienduizend gulden kosten.
Omdat die prijzen nogal uiteen lopen, is het misschien aardig om eens na te gaan in welke opzichten het ene apparaat beter is dan het andere.

11.1 STEREO

Wanneer we naar een stereo afgespeelde plaat of band luisteren, dan horen we sommige instrumenten of stemmen geheel uit de ene of de andere box komen; andere instrumenten hoor je ergens tussen de boxen in. Dit is mogelijk doordat muziek meestal met meerdere microfoons wordt opgenomen waarvan het geluid uiteindelijk gespreid over twee luidsprekerboxen onze kamer binnenkomt.
Om stereo-geluid weer- of door te geven is een volledig dubbele installatie nodig, omdat het om twee verschillende geluidsignalen gaat. Meestal worden die dubbele apparaten in één kast gebouwd; we noemen ze dan stereo-apparaten.
Om muziek in stereo te beluisteren hebben we naast een stereo-installatie ook een stereo-hoofd nodig. Gelukkig hebben de meeste mensen dat!
Met behulp van onze twee oren zijn we namelijk prima in staat om de richting te horen waaruit het geluid komt (zie basisstof). Maar wat net zo belangrijk is: als het geluid van één instrument uit twee richtingen op ons afkomt, dan kunnen we dat in onze hersenen omrekenen tot één richting. Bijvoorbeeld: komt het geluid van een gitaar voor 30 % uit de linker box en voor 70 % uit de rechter, dan horen we het instrument iets rechts van het midden.

- Doe nu proef 1.

Zo vult stereo-geluid de hele ruimte tussen de boxen op.
In de geluidsstudio waar elk instrument meestal met een aparte microfoon wordt opgenomen op een apart spoor van de bandrecorder, wordt erg veel tijd besteed na de opnamen om de instrumenten en stemmen te verdelen over het zogenaamde stereo-beeld: we noemen dit "het mixen" van de opname.

- Verklaar waarom je als je zelf een opname maakt met een stereo-cassetterecorder en twee microfoons je vaak een heel mooi stereo-beeld krijgt.
- Waarom klinkt het het natuurlijkst als je de microfoons dicht bij elkaar zet in tegenovergestelde richtingen?
- Van een popgroep wordt een opname gemaakt. Waar zou je de diverse instrumenten plaatsen in het stereo-beeld?

11.2 HI-FI ..... DE DIN-NORM

Geluidsapparatuur verkrijgt slechts dan het predikaat HI-FI als het aan bepaalde normen voldoet. Deze normen zijn vastgelegd volgens de DIN-code; hierin staat precies beschreven aan welke eisen een platenspeler, een cassetterecorder, de cassette zelf, een versterker of een luidsprekerbox moeten voldoen.

Eén van de belangrijkste kriteria voor de natuurgetrouwheid van een geluidsinstallatie is hoe goed deze de hele hoge en lage tonen weergeeft. We hebben het dan over het frekwentiebereik van een bepaald apparaat. Als we het iets nauwkeuriger willen doen dan moeten we kijken naar de frekwentiekarakteristiek, dat is een grafiek waarin staat aangegeven hoeveel sterker of zwakker bepaalde frekwenties worden weergegeven dan het gemiddelde (meestal in dB).
Voor versterkers is die karakteristiek over het algemeen behoorlijk vlak over een groot gebied en we zeggen dan dat bijv. voor een bepaalde versterker geldt: recht ± 1 dB van 10 - 30000 Hz, d.w.z. de frekwentiekarakteristiek wijkt tussen de genoemde frekwenties niet meer af dan 1 dB van een rechte (horizontale) lijn.
Voor luidsprekers echter zitten er vaak flinke bobbels in (vaak groter dan 3 dB) en dat is dan ook de reden dat alle luidsprekerboxen verschillend klinken.

- Doe nu proef 2.

11.3 DE PLATENSPELER

De platenspeler bestaat eigenlijk uit twee onderdelen: de draaitafel en het aftastgedeelte. Beiden zijn gemonteerd op een draagplaat.
De draaitafel wordt aangedreven door een sychroonmotor, die ervoor zorgt dat de snelheid van de draaitafel konstant blijft. Omdat het toerental van de draaitafel gewijzigd moet kunnen worden, is er een (te wijzigen) overbrenging aangebracht. De overbrenging van motor naar draaitafel vindt meestal plaats via een snaar.

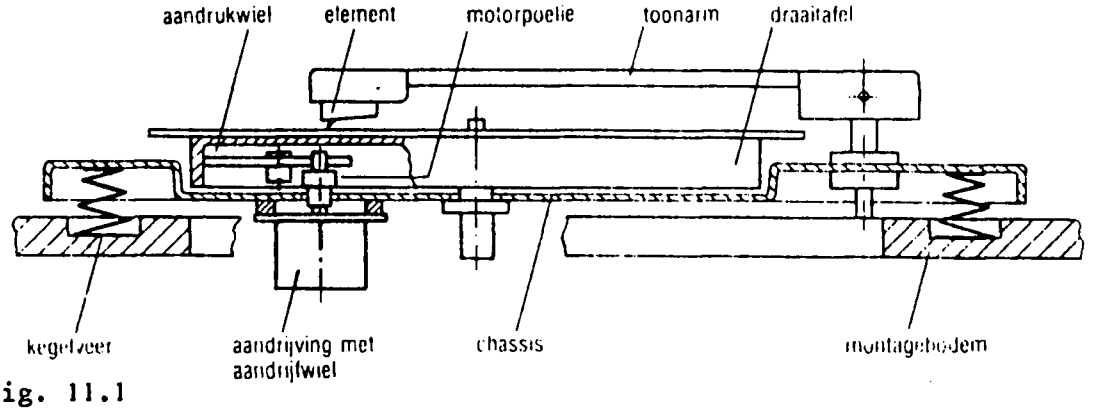


fig. 11.1

De kwaliteit van de draaitafel wordt door drie eigenschappen bepaald: de afwijking van het toerental, de snelheidsvariaties en het zgn. dreunniveau.
In DIN 45500 zijn de minimale eisen vastgelegd waaraan platenspelers moeten voldoen om het predikaat HI-FI te mogen voeren.
Afwijkingen van de genormeerde toerentallen (33,3 en 45 per minuut) hebben toonhoogteveranderingen tot gevolg. Een te hoog toerental levert een te hoge toon en een te laag toerental een te lage toon. Omdat een iets te hoge toon iets minder onaangenaam is dan een iets te lage toon zijn toleranties van +1,5 % en -1% toegestaan. Met een fijninstelling (zie fig. 11.1) kan het toerental ongeveer 3 % worden gevarieerd (ca. een halve toon).
Voor de controle van het toerental gebruikt men het stroboskoopeffekt (zie proef 3).

Als het toerental door de één of andere reden periodiek varieert, dan hoor je de toonhoogte ook periodiek variëren. Variaties tot 5 Hz worden als gejank (of wow) en variaties van 5 tot 100 Hz als zweving (of flutter) hoorbaar. Vaak is de oorzaak een te groot gat (en een niet-centrisch gat) in de grammaofoonplaat. De toonhoogtevariaties nemen toe naarmate de aftastarm van de platenspeler dichter bij het midden komt. We kunnen deze snelheidsvariaties in procenten uitdrukken door de afwijking van het midden (a) door de straal (r) te delen.

- Bepaal deze afwijking eens van een singletje. Geef duidelijk in een plaatje aan hoe je gemeten hebt (gebruik een schuifmaat) (zie fig. 11.2).

Trillingen van motor en aandrijfwielen kunnen in het aftastelement terecht komen (zie fig. 11.3). Door het element worden deze trillingen in elektrische spanningen omgezet en vervolgens worden ze versterkt en in de luidspreker als stoorgeluiden hoorbaar gemaakt.

- Luister eens naar je geluidsinstallatie als je je platenspeler in werking hebt, maar het aftastelement vrij boven de draaiende plaat hangt.

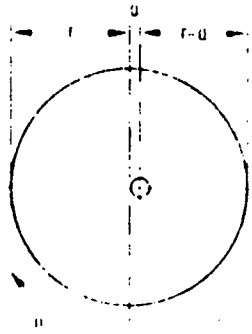
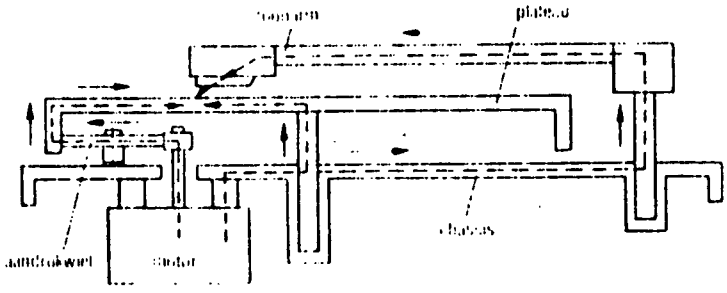


fig. 11.2
Het ontstaan van toonhoogtevariaties door rondloopafwijkingen.

Fig. 11.3
Mogelijke wegen waarlangs de dreun het element kan bereiken.



11.4 HET ELEMENT

In de toonarm van de platenspeler is het element aangebracht. Dit pikt de trillingen van de naald op, zet ze om in elektrische trillingen en geeft ze door aan de versterker.
Er bestaan nogal verschillende typen. We bespreken er één: het dynamisch element.
In dit element zijn er één of twee (bij stereo) beweegbare spoeltjes in een magneetveld geplaatst. De bewegingen van de spoeltjes t.g.v. het trillen van de naald veroorzaken spanninkjes in de spoeltjes.
In fig. 11.4 zie je aangegeven hoe zo'n element er uit ziet.
Misschien lukt het je een (oud) element te pakken te krijgen. Peuter hem eens uit elkaar!

zie vervolg blz. 86

PROEF 1: STEREO HOREN

Sluit een toongenerator aan op een (stereo)cassette-recorder. De opnamesterkte kan je met twee knoppen regelen: één voor de rechter box en één voor de linker box.
Regel de knop voor de rechter box zo dat deze maximaal is (niet in het rood); we noemen dit 100 %. De sterkte voor de linker box staat dus op 0 %.
Neem nu het geluid op de band op; verminder de sterkte voor de rechter box met 10 % en vermeerder de sterkte voor de linker box met 10 %; neem het geluid opnieuw op. Herhaal dit totdat de linker box 100 % krijgt en de rechter box 0 %.
Beluister nu de band, terwijl je op de middelloodlijn van de verbindingslijn tussen de boxen gaat zitten.

PROEF 2: DE FREKWENTIEKARAKTERISTIEK VAN EEN LUIDSPREKERBOX

Maak een frekwentiekarakteristiek van een slechte en een goede luidspreker box.
Kies zelf het frekwentiegebied waarin je wilt meten.
Maak van je metingen een grafiek; gebruik enkel-logaritmisch papier.

PROEF 3: DE PLATENSPELER

a. Onderzoek bij een platenspeler hoe de overbrenging van motor naar draaitafel plaatsvindt.
b. Op welke wijze kan je het toerental wijzigen?
c. Hoe werkt de fijninstelling van de platenspeler?
d. Voor de controle van het toerental gebruikt men een zgn. stroboskopische schijf.
   Als je een (gloei)lamp aansluit op het lichtnet, dan zal t.g.v. de wisselspanning (die een frekwentie van 50 Hz heeft) de lichtintensiteit 100 keer per sekonde variëren.
   - Maak dit met een tekening duidelijk.
   Op de stroboskopische schijf is een aantal strepen aangebracht zo, dat de strepen stil lijken te staan als je de schijf met een lamp belicht.
   - Hoeveel strepen moeten er dan bij een toerental van 33,3 op de schijf staan? Je kan je berekening controleren door het aantal strepen te tellen.

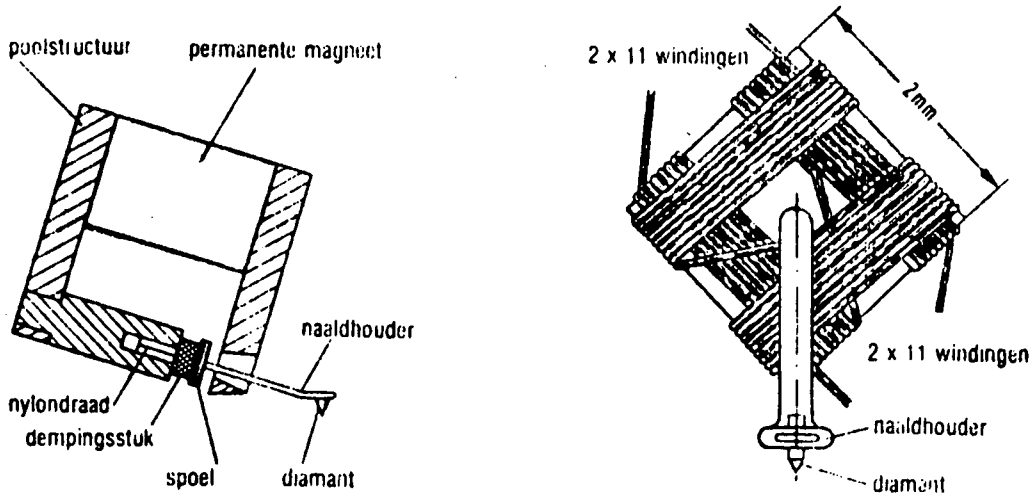


fig. 11.4 Principiële constructie en spoelenopstelling van een dynamisch element (systeem Ortofon).

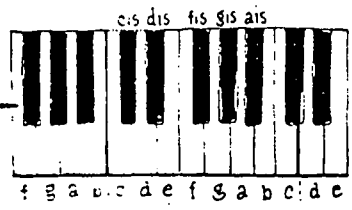
11.5 DE CASSETTERECORDER

De cassetterecorder is een niet meer weg te denken onderdeel geworden van elke goede geluidsinstallatie.
Misschien heb je tijd en de gelegenheid je hier wat meer in te verdiepen.
Probeer hierbij te letten op:
- de wijze waarop de muziek wordt opgenomen en weergegeven
- de kwaliteit van de cassetterecorder: het aandrijfmechanisme
  de ruisonderdrukking
- de kwaliteit van het cassettebandje.

Erg veel literatuur kan je vinden in:
"Platenspelers en cassetterecorders" van Günther Fellbaum en Wolfgang Loos (Kluwer technische boeken; te vinden in elke goede bibliotheek).

12 KEUZEONDERZOEKEN

FREQUENTIE EN TOONHOOGTE



We zullen nu proberen muzikale verschijnselen op een meer fysische manier te benaderen. Je hebt al gezien dat tonen gekarakteriseerd konden worden door hun frequentie. Voor de tweeklanken kun je je nu afvragen of er een verband bestaat tussen de klank en de frequenties van de tonen. In de opdrachten 4.1 tot 4.3 of de opdrachten 4.4 en 4.5 kun je dat verder onderzoeken.

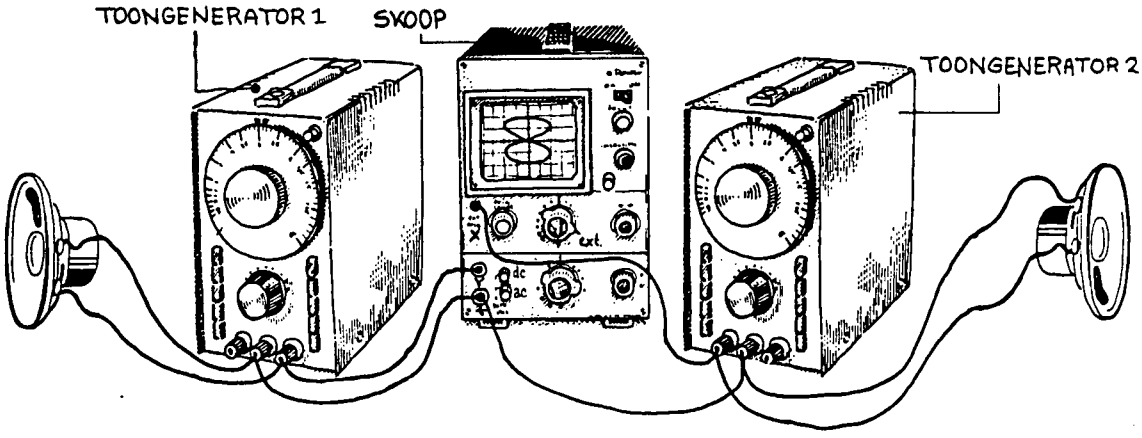
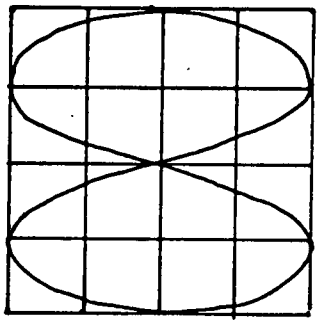


fig. 12.1



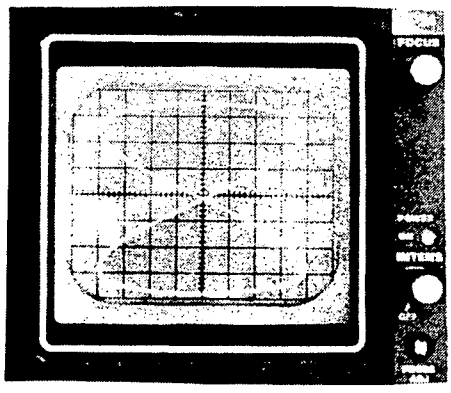


fig.12.2

Je kunt om de "8" een rechthoek tekenen.

Vul in: Een raakpunt aan een vertikaal hoort bij een keerpunt van de beweging van de lichtvlek in de ... richting.
Je ziet aan de "8" vorm dat $f_x : f_y = \ldots$
Klopt dit met de instelling van de toongeneratoren?

Dit type figuur heet een lissajous-figuur.
Ze ontstaan in onze opstelling als de frequenties zich verhouden als eenvoudige gehele getallen.
Bij andere frequentieverhoudingen dan 1:2 worden deze figuren ingewikkelder dan deze "8".

NB De opdrachten 12.1-12.3 kunnen gelijk met of in plaats van opdracht 12.4 uitgevoerd worden.

Opdracht 12.1: Gebruik twee toongeneratoren en een skoop. De twee toongeneratoren worden aangesloten op twee luidsprekers, verder sluit je toongenerator 1 (TG1) op de Y-ingang van de skoop aan en toongenerator 2 (TG2) op de X-ingang. Stel toongenerator 1 in op ca. 528 Hz en toongenerator 2 op het dubbele, ca. 1056 Hz. Schakel de tijdbasis van de skoop uit en regel de zaak zo af dat het beeld het scherm van de skoop netjes vult, terwijl de tonen even sterk klinken. Zie de tekening hiernaast.
Als het goed is, moet je door voorzichtig verdraaien van de fijnregeling op TG2 op het scherm een "8" te zien krijgen. Welke, nu bekende, tweeklank hoor je? Voer ook de opdracht van de bladzijde hiernaast uit.

Opdracht 12.2: Onderzoek de toonreeks do-re-mi. Stel daartoe TG 1 op het gehoor in op de onderste toon van de reeks en TG 2 eveneens op het gehoor op steeds een van de andere tonen. Bij welke tonen komt er een stilstaand lissajonsfiguur (of een bijna stilstaand figuur) te voorschijn? Welke frequentieverhoudingen horen daarbij? Je kunt het direkt aflezen uit de figuur als je weet dat

$$\frac{f_x}{f_y} = \frac{\text{aantal raakpunten aan een verticaal}}{\text{aantal raakpunten aan een horizontaal}}$$

(Raakpunten aan de rechthoek die je om de figuur zou kunnen denken.) Eventueel mag je ook een frequentiemeter gebruiken.

Noteer de resultaten als volgt:

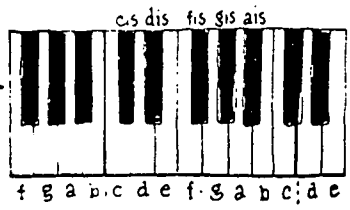
TG1 op toon v.d. reeks nr. I; frequentie..... Hz

TG2 op toon v.d. reeks nr	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
frequentie								
wel/geen lissajousfig.								
$f_x : f_y$ als								

Waar treden de eenvoudigste verhoudingen $f_x : f_y$ op?
Is de bijbehorende tweeklank *ruig* of *glad*?

Opdracht 12.3: Tweeklanken kan je transponeren, dat wil zeggen: één of meer oktaven verhogen.
Neem bijvoorbeeld de tweeklank van de tonen I en IV, en transponeer die op het demonstratieinstrument, door een willekeurige buis ervan als nieuwe toon I te nemen en de bijbehorende IV te zoeken.
Neem de tonen op het gehoor over op de toongeneratoren.
Bepaal $f_x : f_y$.
Waardoor wordt een tweeklank klaarblijkelijk bepaald?

FREQUENTIE EN TOONHOOGTE



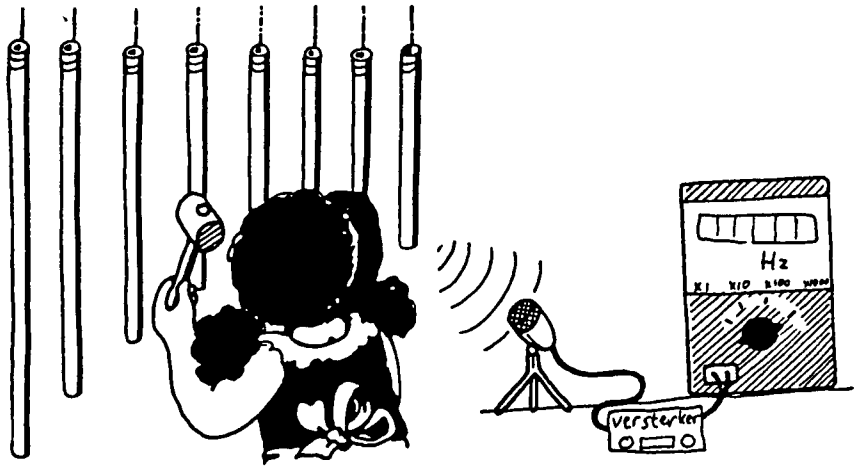


fig. 12.3 Het demonstratie instrument gemaakt van koperen buizen.

In de opdrachten 12.1 t/m 12.5 onderzoek je de bekende do-re-mi toonladder door naar de verhouding tussen de frequentie van een toon en de frequentie van de do-toon te kijken. Je vergelijkt de tonen dus steeds met de laagste toon. Je kunt de reeks ook anders bekijken, en wel door steeds de frequentieverhoudingen tussen de *opeenvolgende* tonen van de reeks te berekenen in opdracht 12.6.

Dan kan je merken dat de do-re-mi reeks uit twee soorten toonsafstanden is opgebouwd: de grote afstanden noemen we "hele" tonen, de kleine noemen we "halve" tonen. Twee halve tonen vormen een hele toon, vandaar de naamgeving. Schematisch ziet de reeks er dus zo uit:

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1/1	1/1	1/2	1/1	1/1	1/1	1/2	

fig. 12.4

Het lijkt misschien gek, een "ladder" met ongelijke stapjes, maar je oren hebben er geen moeite mee.

NB Opdrachten 12.4 en 12.5 kunnen tegelijk met, of in de plaats van de opdrachten 12.1-12.3 worden uitgevoerd.

Opdracht 12.4: Onderzoek met behulp van het demonstratie instrument (zie fig. 12.3) de do-re-mi-reeks. Bepaal met een frequentiemeter, microfoon en eventueel versterker zo nauwkeurig mogelijk de frequentie van de tonen van de reeks. Je krijgt de beste resultaten als je de buizen zachtjes aanslaat. Onderzoek telkens de tweeklanken van de laagste (toon I) van de reeks met één van de andere tonen. Maak een tabel als volgt:

toon nr.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
frequentie (Hz)								
frequentie: frequentie van toon I	1:1							

Welke tweeklanken hebben (afgerond) eenvoudige getallen verhoudingen tussen de frequenties? (Met rekenmachines krijg je als bijv. toon I = 600 Hz en toon IV = 800 Hz is $f_I : f_{IV} = 1{,}333333$.
Het is echter de gewoonte dit getal te noteren als 4 : 3).
Is er een verband tussen de ruigheid van de tweeklank en de frequentieverhouding van de tonen ervan?

Opdracht 12.5: Neem een andere toon als toon I en zoek op het demonstratie-experiment buizen uit zodanig dat de zelfde toonreeks als in de vorige opdracht ontstaat, alleen vanuit een andere toonhoogte (transponeren).

Toon	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
buisnr.								

Herhaal met deze reeks nu opdracht 12.4. Vergelijk de uitkomsten. Zijn er verschillen?

Hangt de klank van een tweeklank af van het frequentieverschil van beide tonen? (Vergelijk de resultaten voor de oorspronkelijke en de getransponeerde reeks.)

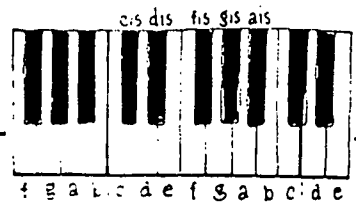
Opdracht 12.6: Gebruik de frequenties van de tonen van de do-re-mi reeks uit opdracht 12.2 of opdracht 12.4 en bepaal de verhoudingen tussen de frequenties van de opeenvolgende tonen:

$$\frac{f_{II}}{f_I} =$$

$$\frac{f_{III}}{f_{II}} =$$

$\vdots$

Welke verhoudingen zijn (tot op enkele procenten) aan elkaar gelijk? Welke verhoudingen wijken duidelijk af? Horen bij de afwijkende verhoudingen grotere of kleinere toonsafstanden dan bij de "normale"?



FREQUENTIE EN TOONHOOGTE

CONSTRUCTIE VAN ONS TOONSYSTEEM.

We gaan uit van de do-re-mi reeks, zoals we die nu al enige malen zijn tegengekomen. Op basis daarvan gaan we kijken wat voor een toonsysteem we kunnen maken.
In opdracht 12.6 en verder ontdekten we de do-re-mi reeks bestaat uit een serie hele en halve toonsafstanden, schematisch voorgesteld (ditmaal met de toonnamen erbij) als:

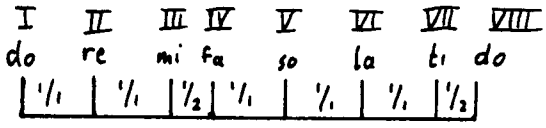


fig. 12.4

Als je nog eens kijkt naar de resultaten van opdracht 12.6, dan kun je zelf nagaan, dat twee keer een stapje van een halve toon dezelfde toon levert als een stap van een hele toon.
Uit de eigenschappen van het oktaaf volgde, dat we de reeks tonen uitbreiden door hem een oktaaf lager en hoger te herhalen. Onze toon"ruimte" ziet er dan schematisch uit als:

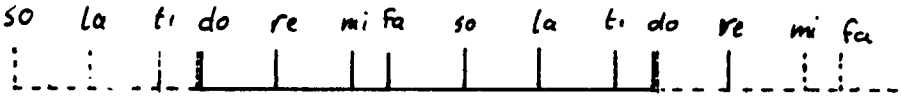


fig. 12.5

Zo krijgen we al een behoorlijke uitbreiding van het tonenmateriaal. Als we nu eens op de tweede toon (re) wilden beginnen, krijgen we dan een nieuwe do-re-mi reeks? Waarom niet?
Het is dus nodig om een aantal extra tonen toe te voegen, tussen de oude in. Waar ze moeten komen zien we als we vanaf de tweede toon een nieuwe do'-re'-mi' reeks tekenen.

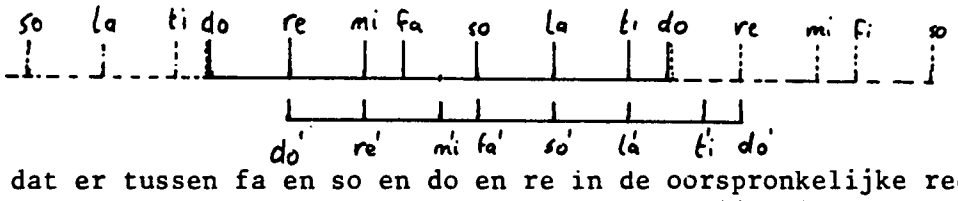


fig. 12.6

Je ziet dat er tussen fa en so en do en re in de oorspronkelijke reeks tonen moeten worden ingevoegd. Dat doen we, en tegelijk kijken we wat er gebeurt als we vanaf de derde toon (mi) van de oorspronkelijke reeks do"-re"-mi" reeks bouwen:

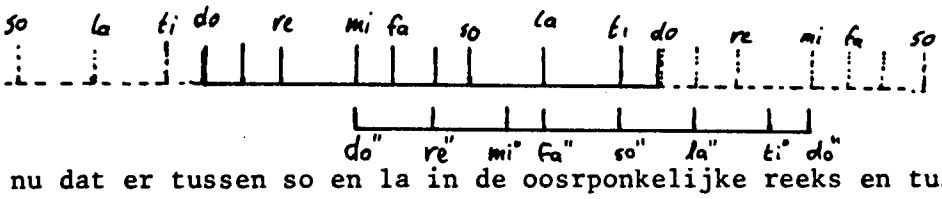


fig. 12. 7

We zien nu dat er tussen so en la in de oosrponkelijke reeks en tussen re en mi twee tonen moeten worden toegevoegd. Nadat we deze aan ons "toonsysteem" hebben toegevoegd, kijken we nog naar een do"'-re"'-mi"' reeks vanaf de oorspronkelijke fa.

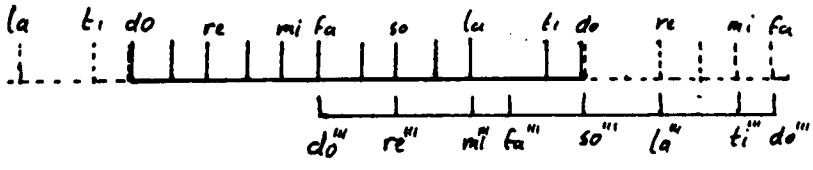


fig. 12.8

Opdracht 12.7:

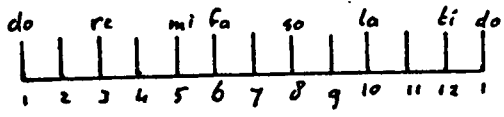


fig. 12.9

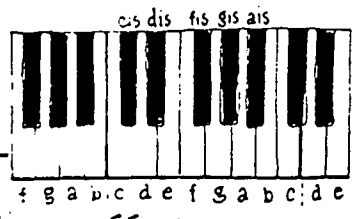
Noem de frequentie van toon 1 (do) f_o. Wat is de frequentie van toon 8 (so) 7 halve tonen verder? We kunnen dan vanuit toon 8 toon 3 (re) vinden. 7 Halve tonen hoger dan toon 8 ligt een toon die precies een oktaaf hoger is. Om toon 3 te vinden moeten we dus de frequentie van die toon halveren, enz. We volgen de procedure die tot de volgende tabel leidt:

naam	toonnr.	frequentie
do	1	f_o
so	8	$3/2\ f_o$
re	3	$1/2 \times 3/2 \times (3/2\ f_o) = 9/8\ f_o$
la	10	$3/2 \times (9/8\ fo) = 27/16\ f$
mi	5	$1/2 \times 3/2 \times (27/16\ f_o) = 81/64\ f_o$
ti	12	

Maak de tabel af, tot je bij toon 13 bent uitgekomen.
Frequentie toon 14 = ... x f_o

De afstand van toon 1 tot toon 13 (do-re) is een oktaaf. Wat volgt daaruit voor de frequentieverhouding van de tonen 1 en 13? Klopt dat met wat je gevonden hebt? Is het antwoord groter of kleiner dan dat uit de tabel afkomstig? Is het verschil groter of kleiner dan een halve toon?

Opdracht 12.8: (Kan alleen met een piano of een electronisch orgel.)
Vind een goed gestemde piano of een orgel. Sla de afstand do-so tegelijk aan (7 halve toonsafstanden, we noemen het meestal een kwint). Probeer de zwevingen te horen. Luister naar iets in de orde van 1 Hz. Als je niets hoort, probeer dan het volgende: sla alleen de onderste toon aan, zing dan zo zuiver mogelijk de bovenste. Sla zonodig de onderste toon opnieuw aan. Sla dan, terwijl je de gezongen toon onveranderd volhoudt de bovenste toon aan. Is dat precies dezelfde als die je zong? Hoger? Lager? Herhaal dit enige malen op verschillende toonhoogten (niet laag, daar is het moeilijker te horen).



FREQUENTIE EN TOONHOOGTE

Je ziet dat we tussen la en ti in de oorspronkelijke reeks nog één toon missen. Vullen we die in, dan ontstaat tussen do en do dit patroon:

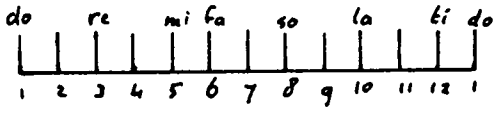


fig. 12.10

De oospronkelijke reeks is nu voorzien van vijf tussentonen. De totale reeks bestaat zo uit twaalf verschillende tonen die allemaal een halve toon uit elkaar liggen.
Met dit systeem kun je vanaf elke toon een do-re-mi reeks maken zonder tonen te hoeven toevoegen. Ga dat na.

Nu is het probleem, als we van één der tonen, bijvoorbeeld do (toon nummer 1) de toonhoogte vastleggen, hoe vinden we dan de toonhoogten van de andere elf?
We zouden kunnen bepalen wat de frequentieverhouding van een halve toonsafstand is, en zo steeds de volgende toon uitrekenen. Omdat de verhouding niet veel van 1 verschilt is dit niet erg nauwkeurig. Een andere methode is als volgt. Bij je proeven met het snaarplankje heb je gezien dat de frequentieverhouding tussen do en so (dezelfde afstand als tussen de eerste en tweede boventoon van een gegeven grondtoon) 2:3 bedraagt.
Deze afstand bedraagt 7 halve tonen, zoals je in het schema hierboven kunt zien.

Als we ons toonsysteem "stemmen" met de afstand do-so (7 halve toonsafstanden) komen we te hoog uit bij de laatste do. Ons oor is echter heel gevoelig voor de zuiverheid van oktaven. Het is dus belangrijk dat de afstand do-do in frequenties uitgedrukt exact 1:2 bedraagt. We kunnen ons uit het probleem redden door de afstand do-so en alle corresponderende afstanden iets kleiner te maken. Daardoor wijkt die afstand iets af van de "natuurlijke" verhouding 2:3, maar komen we precies uit in de afstand do-do, als we de procedure van blz. 92 zouden herhalen.
In ons toonsysteem "zweven" de tonen do-so vergelijkbare afstanden omdat hun frequentie's zich niet precies als gehele getallen verhouden. Alle afstanden van 7 halve tonen zweven even-veel. Daarom noemen we deze "stemming" gelijkzwevend. Omdat vroeger een stemming ook wel temperatuur genoemd werd (niet met warmte te verwarren) heet deze stemming officieel de gelijkzwevende temperatuur. Het probleem hierboven komt overeen met het stemmen van een piano, met do-re.... van de oorspronkelijke tonen de zeven witte toetsen en de vijf tussen tonen de vijf zwarte toetsen van het oktaaf. Wat je hebt berekend doet een pianostemmer op het gehoor.
Tot de 18e eeuw waren ook nog andere stemmingen in gebruik, waarbij niet alle afstanden van 7 halve tonen evenveel werden verkleind. Sommigen waren precies 2:3 (rein) andere moesten daardoor extra worden verkleind, waardoor ze extra gingen zweven. Ze zweefden zo erg dat ze "wolf" genoemd werden vanwege het huilende geluid. De akkoorden waar deze samenklanken in voorkwamen werden in de muzikale taal van die dagen niet gebruikt. Daar stond tegenover dat de meest gebruikte akkoorden van die tijd praktisch zonder zwevingen klonken.