

MUZIEK

AANVULLING
VOOR 6 VWO



vwo bovenbouw
natuurkunde projekt

PLON UvA RUG

MUZIEK

VWO-BOVENBOUW NATUURKUNDE PROJECT

Het VWO-bovenbouw natuurkunde project streeft een inhoudelijke en didactische vernieuwing van het natuurkunde onderwijs in de bovenbouw VWO na. Daartoe zijn thema's en blokken geschreven. In een thema staat een vraag uit de dagelijkse omgeving, de techniek, de samenleving of een wetenschapsgebied centraal en worden natuurkunde inhouden vanuit die vraagstelling gekozen. In een blok staan enkele kernbegrippen uit de natuurkunde in de systematische samenhang van het vak centraal. Aan de hand van reële probleemstellingen worden de begrippen (verder) opgebouwd en uitgediept en wordt aandacht besteed aan het oplossen van problemen met behulp van de betreffende begrippen.

Overzicht van geschreven materiaal

a. *materiaal voor experimentele keuzegroepen VWO:*

1. Muziek (havo/vwo thema + aanvullend VWO-hoofdstuk
(experimenteel keuzeonderwerp De natuurkunde van muziek)
2. Automatisering
(experimenteel keuzeonderwerp Microelektronica)
3. Rond 1900
(experimenteel keuzeonderwerp Golf-deeltjesdiscussies rond 1900)
4. Ioniserende Straling (havo/vwo thema + vwo hoofdstuk 'Stralingsfysica in het ziekenhuis')
(experimenteel keuzeonderwerp Ioniserende Straling in de Gezondheidszorg)

b. *materiaal dat (grotendeels) binnen de reguliere VWO-leerstof valt:*

1. Verkeer (havo/vwo thema, 4e klas)
2. Bewegingen (blok, 4e klas)
3. Energie (thema, 4e/5e klas)
4. Sport (thema, 4e/5e klas)
5. Arbeid en Energie (blok, 5e klas)
6. Elektromotoren (thema, 5e klas)
7. Deeltjes in velden (blok, 5e/6e klas)

c. *materiaal dat (grotendeels) buiten de reguliere VWO-leerstof valt:*

1. Lijfwerk (thema, 4e klas)
2. Het Weer (thema, 4e klas)
3. Satellieten (thema, 6e klas)

Experimenteel natuurkunde thema voor de 6e klas VWO. Samengesteld door medewerkers van het VWO-bovenbouwproject en projectleraren.

© 1985 Rijksuniversiteit Utrecht, Universiteit van Amsterdam,
Rijksuniversiteit Groningen

PLON, Lab. 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

Oriëntatie	V 5
1. Frekwentie en toonhoogte	V 7
1.1 Inleiding	V 7
1.2 Toon en interval	V 7
1.3 Zwevingen	V 11
2. Muziekinstrumenten	V 14
2.1 Inleiding	V 14
2.2 Toonvorming en overdracht	V 15
2.3 Natuurkundige achtergronden van geluid	V 18
2.4 Snaarinstrumenten	V 23
2.5 Blaasinstrumenten	V 31
2.6 Herkennen van instrumenten en klinkers	V 41
2.7 Tot slot	V 43

1. *Waarom dit keuzeonderwerp?*

Dit keuzeonderwerp gaat over de natuurkundige aspecten van muziek. Een belangrijk kenmerk van muziek is, dat zij elke keer opnieuw weer tot klinken moet worden gebracht. Daar zijn mensen voor nodig die zingen of op een instrument spelen. Daar zijn zalen voor nodig waar de muziek goed in klinkt. En vaak komt er apparatuur aan te pas om de muziek op te nemen en weer te geven. Allemaal situaties waarin natuurkundige begrippen en theorieën een rol spelen.

Een deel van de begrippen die in dit boek aan de orde zullen komen, ken je al uit de kernleerstof. Vooral uit de categorie *trillingen en golven*. Andere begrippen zullen nieuw zijn, zoals *samengestelde trillingen*, *geluidsniveau*, *frequentie*, *karakteristiek* en *nagalmtijd*.

We hopen dat in dit keuzeonderwerp niet alleen je kennis van begrippen toeneemt, maar dat je ook beter leert begrijpen hoe je instrument werkt, welke invloed een ruimte om te luisteren op muziek heeft. En dat je door al die dingen beter van muziek kunt genieten.

2. *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 zij 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 cultuur waarin zij wordt beoefend. In alle oude culturen werd de oorsprong van muziek bij goden gezocht. De religie was sterk vervlochten met het dagelijks leven van de mensen en daarmee ook de muziek.

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 gecultiveerder en geraffineerder. Zo deed bijv. de merstemmigheid op grote schaal zijn intrede. Gaandeweg ontstond het klimaat voor wat wij nu 'grote componisten' 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 door bijna niemand beluisterd worden. Vaak ook door de componisten niet. Dat zorgde ervoor dat de voor deze orkesten bestemde muziek elitair was. Dat is pas in deze eeuw van massa-communicatie aan het verminderen. Iets anders is dat door deze communicatie (opname- en weergavetechniek!) ook verschillende soorten muziek elkaar veel gemakkelijker beïnvloeden. Let maar eens op de moderne muziek.

Muziek bestaat in talloze soorten en stijlen. Beschikbare materialen hebben altijd veel invloed gehad op de instrumentbouw, en daarmee ook op de klank en de stijl.

ORIENTATIE

Muziek kan allerlei functies hebben. Bij de oude Grieken was muziek verbonden met dans, spel, zang en dichtkunst. In onze samenleving kan muziek bijv. 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.

3. Indeling van de lessen

Hoe je dit boek moet gebruiken, is grotendeels ter beoordeling aan jezelf en je docent. De beschreven stof is te omvangrijk om in de beschikbare tijd in zijn geheel en grondig bestudeerd te kunnen worden.

We adviseren de eerste twee hoofdstukken als basis voor het onderwerp te beschouwen en deze dan ook in hun geheel te doen. Ook het begrip *geluidsniveau* en de eenheid *decibel*, beschreven in hoofdstuk 3 (Luisteren naar muziek) rekenen we tot de basisstof van dit keuzeonderwerp.

De resterende tijd kun je gebruiken om de hoofdstukken 3 t/m 5 te bestuderen in een wat hoger tempo. Je kunt ook een onderwerp uit de hoofdstukken 2 t/m 5 kiezen voor verdere verdieping.

Hoofdstuk 6 dient om aanwijzingen te geven omtrent verslaggeving. Dit is vooral bedoeld voor leerlingen die een deel van het onderwerp in een zelfstandig onderzoek uitwerken.

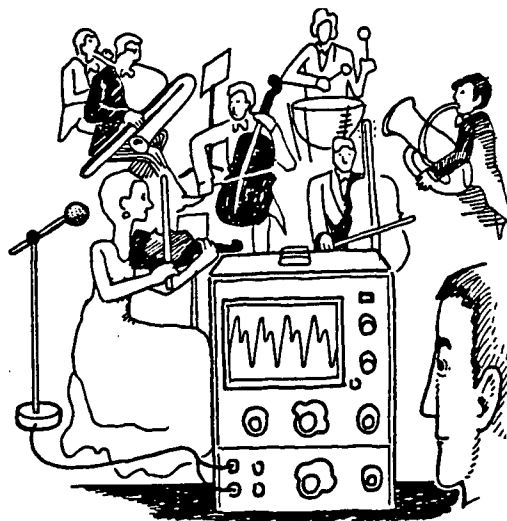


fig. 1:
Eén aspect van Muziek: het 'geluidsbeeld'.



fig. 2:
Oude Egyptische schilderijen, welke vele duizenden jaren oud zijn en muzikale voorstellingen dragen.

1 FREKVENTIE EN TOONHOOGTE

1.1 Inleiding

In dit korte hoofdstuk leggen we een verband tussen het muzikale begrip *toonhoogte* en het natuurkundige begrip *frekventie*.

Als twee tonen van vrijwel dezelfde hoogte (maar niet precies dezelfde!) samenklanken, horen we een *zweving*. Dit verschijnsel, van belang bij het stemmen van instrumenten, zal toegelicht worden.

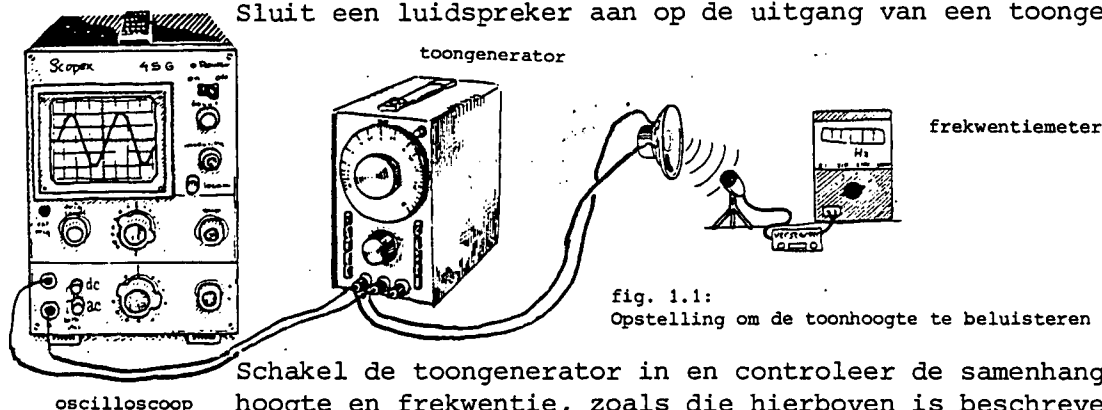
1.2 Toon en interval

Wanneer je met een stemvork op de hoek van de straat gaat staan en aan diverse voorbijgangers vraagt, uitgaande van de stemvorktoon, een toonladder te zingen of te fluiten, krijg je van de meeste mensen dezelfde toonladder te horen. Blijkbaar zitten de toonhoogten die horen bij do - re - mi - fa - so - la - ti - do op een reproduceerbare manier in de geheugens verankerd. Ook is vrijwel iedereen in staat, van twee tonen de hoogste en de laagste te onderscheiden. En de meeste mensen kunnen na enige oefening 'hele' en 'halve' toonsafstanden onderscheiden.

Geluid klinkt als een toon, wanneer de bijbehorende trilling een vaste frekventie heeft. Hoe hoger die frekventie is, des te hoger klinkt de toon.

Proef 1.1 TOONGENERATOR ALS GELUIDSBRON

Sluit een luidspreker aan op de uitgang van een toongenerator.



Schakel de toongenerator in en controleer de samenhang tussen toonhoogte en frekventie, zoals die hierboven is beschreven. De frekventie kan

- 1) worden afgelezen op de schaal van de afstemknop;
- 2) worden afgelezen op een aangesloten oscilloscoop;
- 3) worden afgelezen op een elektronische frekventiemeter (rechtstreeks of via een microfoon aangesloten).

De afstand tussen twee tonen wordt ook wel een *interval* genoemd. Om de natuurkundige betekenis van dit begrip duidelijk te maken, beginnen we met een makkelijk interval: het *octaaf*. Het octaaf is de afstand tussen de laagste en de hoogste toon van een toonladder (lage 'do' - hoge 'do'). In de volgende proef kun je controleren, dat twee tonen die een octaaf verschillen, een frekventieverhouding van 1:2 hebben.

Proef 1.2 OCTAVEN

Stel op het gehoor een toongenerator met luidspreker af op de toon van een stemvork. Lees de frekventie af (f_1).

- a. Verdubbel de frekventie van de toongenerator ($2f_1$). Beluister deze frekventie samen met de stemvork.
- b. Herhaal de frekventieverdubbeling ($4f_1$, $8f_1$ enz.) en beluister de nieuwe tonen steeds samen met de toon van de stemvork.
- c. Hoeveel octaven omvat het gebied tussen 100 en 3200 Hz?

FREKVENTIE EN TOONHOOGTE

We hebben nu met een opvallend en belangrijk verschijnsel kennis gemaakt, dat ook voor andere intervallen dan het oktaaf geldt: het *interval* tussen twee tonen (de hoogste *min* de laagste) hangt samen met de *verhouding* tussen de bijbehorende frekwenties (de hoogste *gedeeld door* de laagste).

Vraag 1.1

Een toon heeft een frekwentie f_1 . Een andere toon, met frekwentie f_2 ligt n octaven boven de ene.

a. Bereken dat $f_2 = f_1 \cdot 2^n$

Een derde toon heeft frekwentie $f_3 = f_1 \cdot 2^m$

b. Bereken hoeveel octaven de derde toon boven of onder de eerste ligt.

Vraag 1.2

Twee tonen verschillen n octaven. De hoogste heeft een frekwentie f_h , de laagste f_l .

Bereken dat $n = {}^2\log \frac{f_h}{f_l}$

Nu zijn er nog veel meer intervallen door het oktaaf. Als we ons beperken tot de intervallen binnen een toonladder, vinden we de belangrijke namen in tabel 1.1.

naam van het interval	bijbehorende toon-namen	eerste twee tonen van	bijbehorende frekventieverhouding
priem	do - do	"'k Zag twee beren"	1:1
sekunde	do - re	"Vader Jacob"	8:9
terts	do - mi	"Een twee drie vier, hoedje van papier"	64:81
kwart	do - fa	"Wilhelmus"	3:4
kwint	do - so	"Altijd is Kortjakje"	2:3
sext	do - la	"Een muisje vond in 't beukenbos"	16:27
septiem	do - ti	(geen bekende begin-regels)	128:243
oktaaf	do - do	(geen bekende begin-regels)	1:2

tabel 1.1: De intervallen en bijbehorende frekventieverhoudingen in een majeur-toonladder (de "gewone do-re-mi-ladder").

De toonladder waarvan in tabel 1.1 de intervallen benoemd zijn, heet de *majeur- of grote-terts-toonladder*. Deze wordt gekenmerkt door een 'halve' toonsafstand (*kleine sekunde*) tussen de derde en de vierde toon (mi-fa) en tussen de zevende en de achtste toon (ti-do), en een 'hele' toonsafstand (*grote sekunde*) tussen de andere.

Vraag 1.3

Een bepaalde majeur-toonladder heeft als frekwentie van de laagste toon $f_1 = 130$ Hz.

a. Bereken met behulp van de verhoudingen in de laatste kolom van tabel 1.1 de frekwenties van de andere tonen.

FREKWENTIE EN TOONHOOGTE

- b. Bereken steeds de frekwentieverhouding tussen twee opeenvolgende tonen in twee decimalen.
 c. Beschrijf het verschil in frekwentieverhouding tussen een hele en een halve toonsafstand.

Behalve de majeur-toonladder zijn er nog allerlei andere. De *mineur-ladder* (in twee versies) verdeelt het octaaf eveneens in zeven intervallen, maar de halve afstanden liggen op andere plaatsen. De *pentatonische ladder* verdeelt het octaaf in vijf intervallen (drie grote sekundes en twee kleine tertsen); de tonen hieruit klinken dikwijls in bijv. zigeunermuziek. Een toonladder die aparte vermelding verdient is de *dodekafonische ladder*, die het octaaf in twaalf gelijke afstanden verdeelt. Twaalf kleine sekundes vormen samen een octaaf, net als vijf grote en twee kleine, in de traditionele majeur- en mineur-ladder. Muziek, geschreven in de traditionele toonsoorten, 'bevoordeelt' een aantal tonen, die heel vaak klinken, terwijl andere nooit aan bod komen. De Oostenrijker Arnold Schönberg, die zijn belangrijkste werken in de eerste helft van de twintigste eeuw componeerde, ging op een gegeven moment principieel het twaalftoonssysteem gebruiken, waarin alle tonen evenveel kans hadden te verschijnen.

Voor een wiskundige beschrijving van de tonen is het twaalftoonssysteem aantrekkelijk, omdat tussen elk paar opeenvolgende tonen hetzelfde interval zit, ofwel dezelfde frekwentieverhouding heerst.

Vraag 1.4

Beredeneer dat de frekwentieverhouding tussen twee opeenvolgende tonen in de dodekafonische ladder $\sqrt[12]{2} = 1,0595$ is.

Vraag 1.5

Controleer of de intervallen uit tabel 1.1 dezelfde frekwentieverhoudingen opleveren, wanneer je ze beschouwt als een geheel aantal malen een halve-toonsafstand, elk met verhouding 1,0505.

Vraag 1.6 (voor de liefhebbers)

Leid af dat voor een interval van n halve tonen tussen een hoogste frekwentie f_h en een laagste frekwentie f_l geldt:

$$n = 12 \cdot {}^2\log \frac{f_h}{f_l} \quad (= 12 \cdot \frac{\ln f_h - \ln f_l}{\ln 2})$$

Leid zelf een formule af die f_h uitdrukt in f_l en n .

namen van tonen

De namen die de tonen in de toonladder hebben (do, re, mi, enz.) zijn niet de meest gebruikelijke in Nederland. De *do* wordt meestal *C* genoemd, de *re* *D*, de *mi* *E*, enz. (zie fig. 1.2).

Na enig geschuif in de loop der eeuwen is bovendien overeengekomen de frekwentie van 440 Hz tot standaardtoon te verheffen: de *A*, of *A₄*. Die index '5' dient om deze *A* te onderscheiden van de *A*'s die één of meer octaven van deze afwijken (hoe hoger de *A*, des te hoger de index).

Vraag 1.7

Ga na dat de *do* van 130 Hz uit vraag 1.3 de toon *C₃* is (bereken eerst de frekwentie van *A₃*, en leid daaruit die van *C₃* af).

FREKWENTIE EN TOONHOOGTE

Wanneer een toon een halve toon verhoogd wordt, voegt men *-is* aan de naam toe (*C* wordt *Cis*, *A* wordt *Ais*, enz.). Bij verlaging wordt een *-es* of *-s* toegevoegd (*D* wordt *Des*, *A* wordt *As*, *E* wordt *Es*, enz.).

Vraag 1.8

In de gelijke-intervalsbenadering van het twaalftoonssysteem is de *Cis* gelijk aan de *Des*, de *Dis* aan de *Es*, de *Fes* aan de *E*, enz. Noem, met behulp van figuur 1.2 de alternatieve namen van *Eis*, *Ges*, *Bes* en *Bis*.

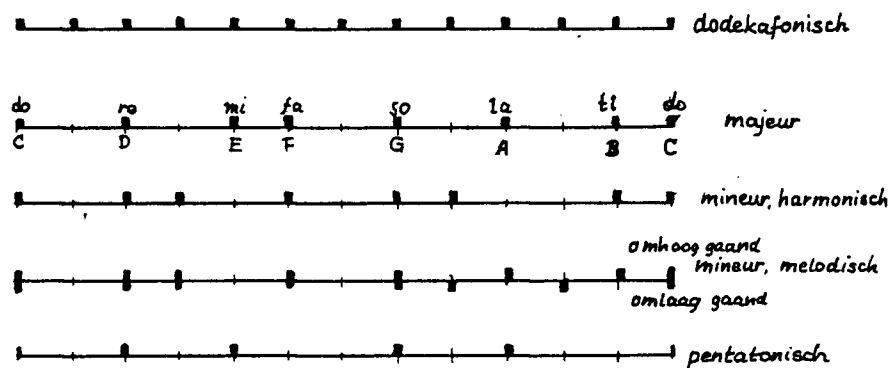


fig. 1.2:
Schematische weergave van diverse toonladders.

Vraag 1.9

Een andere manier om tonen uit elkaar af te leiden is die met de *kwintencirkel*.

Als je steeds een factor $\frac{3}{2}$ omhoog gaat in frekwentie, kom je alle twaalf tonen een keer tegen, zie figuur 1.3.

- Ontbreekt de *F* in deze cirkel? Uitgaande van de *C* kom je zo uiteindelijk bij de *Bis*, die volgens figuur 1.2 gelijk zou zijn aan een *C*.
- Toon aan, dat een interval van twaalf kwinten overeenkomt met ongeveer zeven octaven.

Het woordje *ongeveer* is belangrijk voor bijvoorbeeld pianostemmers. Een kwint is op het gehoor namelijk makkelijk te stemmen. Je zou alle tonen zo kunnen stemmen, uitgaande van een stemvork (bijv. 440 Hz) en de 'kwintencirkel'.

Het antwoord op onderdeel b. laat zien, dat deze methode misgaat: zeven octaven verder ben je al aardig vals, een factor 1,0136 namelijk. Een *Bis* is toch iets anders dan een *C*.

- Toon aan, dat een frekwentieverhouding van

$$\frac{3}{2} \cdot \frac{1}{(1,0136)^{7/12}} \text{ voor een kwint dit stemprobleem oplost.}$$

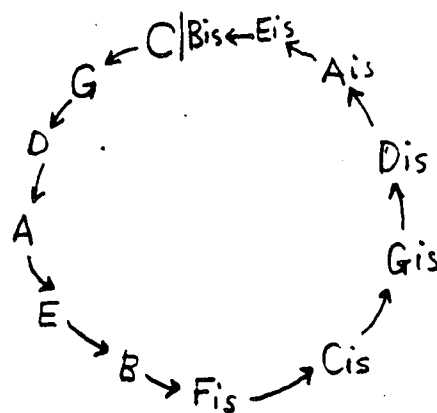


fig. 1.3:
De kwintencirkel.

FREKWENTIE EN TOONHOOGTE

Hoe absurd het ook lijkt, deze uiterst subtiele verschillen kan een goede stemmer redelijk benaderen, door naar *zwevingen* in de kwinten te luisteren.

d. Is je antwoord op vraag a. veranderd?

Een overzicht van toon-namen, frekwenties en hun voorkomen in het bereik van diverse instrumenten en stemmen vind je in figuur 1.4.

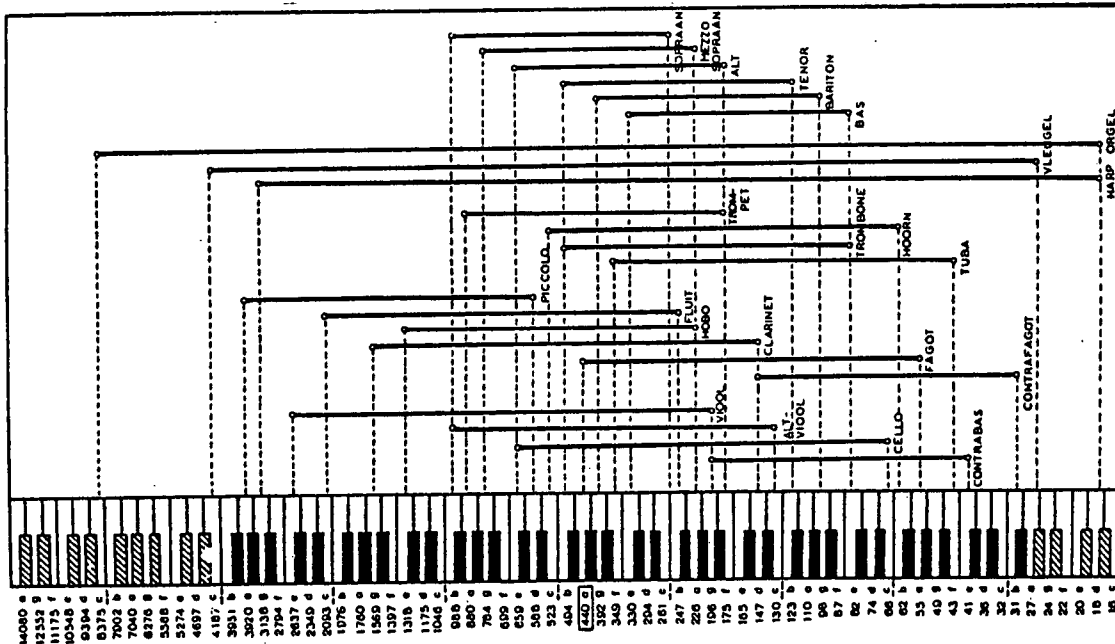


fig. 1.4:
Frekwentiebereik van verschillende muziekinstrumenten en van de menselijke stem.

Proef 1.3 INTERVALLEN EN FREKWENTIEVERHOUDINGEN

Meet van een hele twaalftoonladder, gespeeld op een beschikbaar instrument, of gezongen, van elke toon de frekwentie. Gebruik een opstelling als in fig. 1.1.

Ga na of de verhoudingen tussen de gemeten frekquenties overeenkomen met wat de tekst hierboven stelt. Hebben gelijke intervallen ook gelijke frekwentieverhoudingen?

(N.B. Als dit niet zo is, hoeft het instrument daarom beslist nog niet vals te zijn. Iedere toonsoort heeft zijn eigen afwijkingen van het genivelleerde 'ideaal' dat bijv. uit vraag 1.6 spreekt.)

1.3 *Zwevingen*

Kan het gehoor een frekwentie van 440,0 Hz onderscheiden van 440,1 Hz? Dat zou voor het zuiver spelen of zingen en voor het stemmen van een instrument wel erg comfortabel zijn (als tenminste 'horen dat het vals is' tot correcties kan leiden, een kunst die niet iedereen verstaat).

Het antwoord is: ja, *mits* beide tonen *tegelijk* klinken en ongeveer dezelfde amplitude hebben.

Figuur 1.5 laat zien wat er gebeurt, als twee trillingen met gelijke amplitude en iets verschillende frekquenties worden opgeteld.

Het resultaat is een toon met de gemiddelde frekwentie, die in amplitude varieert tussen het verschil en de som van beide afzonderlijke amplitudes. Deze variatie wordt *zweving* genoemd, en wordt waargenomen met de verschil-frekquenties.

FREKWENTIE EN TOONHOOGTE

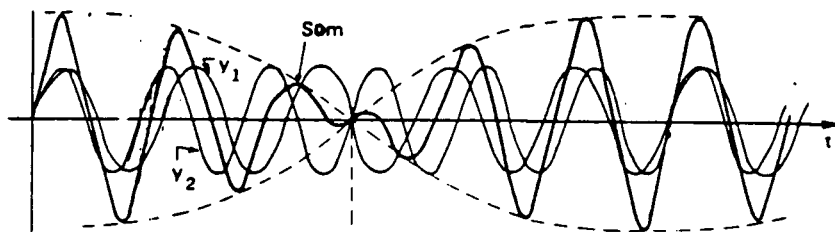


fig. 1.5:
Het optellen van twee trillingen met gelijke fase op $t = 0$ en ongelijke frekwentie. Het resultaat is een zweving met een frekwentie gelijk aan $\Delta f = f_2 - f_1$.

Vraag 1.10 (voor de liefhebbers)

a. Toon aan, dat voor de som van twee trillingen met frekwentie f_1 resp. f_2 , en gelijke amplitudes A geldt:

$$\begin{aligned} u(t) &= A \sin 2\pi f_1 t + A \sin 2\pi f_2 t \\ &= 2A \sin [2\pi \cdot \frac{1}{2}(f_1 + f_2) \cdot t] \cdot \sin [2\pi \cdot \frac{1}{2}(f_1 - f_2) \cdot t] \\ &= 2A \sin (2\pi f_{\text{gem}} \cdot t) \cdot \sin (2\pi \cdot \frac{1}{2} \Delta f \cdot t) \end{aligned}$$

b. De zwevingsfrekwentie die het oor hoort, is tweemaal de $\frac{1}{2} \Delta f$ die in bovenstaande formule genoemd wordt. Beredeneer dit, m.b.v. figuur 1.5.

Als de twee verschillende tonen niet tegelijk klinken, treden er geen zwevingsverschijnselen op, en kan het oor de genoemde kleine afwijkingen niet meer waarnemen.

Proef 1.4 ZWEVINGEN BELUISTEREN EN METEN

a. Twee identieke stemvorken kunnen ongelijk gemaakt worden door op één ervan een klemmetje te schroeven. De plaats van het klemmetje bepaalt de mate van afwijking.

Beluister twee van die ongelijke stemvorken, schat de zwevingsfrekwentie en meet die m.b.v. een microfoon of dB-meter, aangesloten op een oscilloscoop (zie fig. 1.1 en fig. 1.7).

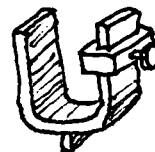


fig. 1.6:
Een verzwaarde stemvork.

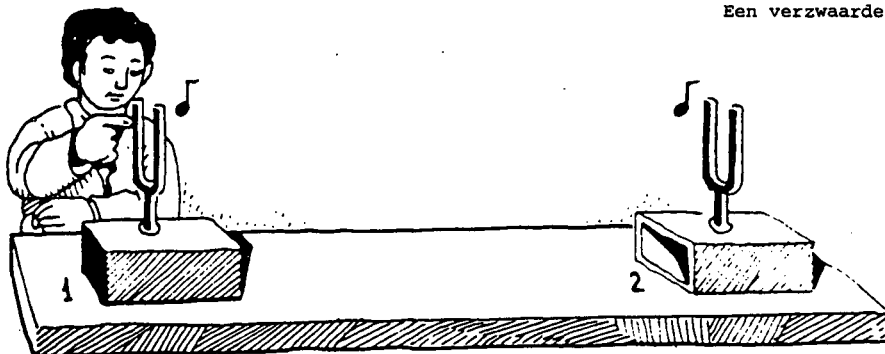


fig. 1.7:
Beoordeling van twee (bijna) gelijke stemvorken.

FREKVENTIE EN TOONHOOGTE

Leid uit de zwevingsfrequentie en de op de stemvork gegraveerde frequentie de afwijkende frequentie af, en verifieer deze met een losse meting op de oscilloscoop.

b. Ga na welk verschil je oor kan horen, als de tonen *na* elkaar klinken.

- Laat een ander de stemvorken aanslaan en het klemmetje 'at random' verplaatsen of wegnemen, en kijk zelf de andere kant op. Waarom?

- Vervang zo nodig de stemvorken door toongeneratoren met luidsprekers.

Zwevingen kunnen ook klinken tussen tonen met sterk afwijkende frequenties. Een zwevend octaaf of een zwevende kwint is op een viool of gitaar (of valse piano) goed hoorbaar te maken. Een A_5 van 440 Hz 'zweeft' met een A_6 van 879 Hz. De achtergrond is, dat de snaar die met 440 Hz trilt, tegelijk óók met 880 Hz trilt (een *boventoon*, zie hoofdstuk 2). En die 880 Hz 'zweeft' met de 879 Hz van de andere snaar (de grondtoon). Zo kan bij een kwint een zweving optreden tussen de eerste boventoon van de hoogste snaar met de tweede boventoon van de laagste. En daar maakt de pianostemmer uit vraag 1.9 gebruik van.

2 MUZIEKINSTRUMENTEN

2.1 Inleiding

"De mooiste viool is die met de grootste draagkracht. Zelfs het zachtste pianissimo kan dan gehoord worden in de verste hoeken van de Royal Albert Hall; zeven- à achtduizend mensen kunnen in de ban van die betovering zijn en zich bewust worden van het minste zuchtje geluid dat hun hart beroert".

Dit schrijft de bekende violist Jehudi Menuhin in een boek over vioolspe-
len. Hij stelt een duidelijke eis aan de viool. Maar dan: hoe maak je zo'n
viool, waar moet je op letten?

In hetzelfde boek schrijft de vioolbouwer Etienne Vatelot:

"Een viool bestaat uit 82 of 84 stukjes hout en dan kunnen bovendien onder-
en bovenblad nog uit één of twee delen bestaan.

De houtsoorten die gebruikt worden zijn: esdoorn voor het onderblad, de
zijranden, de krul en de hals, vurehout voor het bovenblad, ebbehout voor
de toets en buxus, rozehout of ebbehout voor de sleutels (of schroeven),
het staartstuk en het knopje.

De klankschoonheid is van verschillende factoren afhankelijk: de keuze en
de leeftijd van het hout, het ontwerp van de vorm, de welving van het bo-
ven- en onderblad, de dikte en de spanning van de zangbalk die het boven-
blad ondersteunt, de soepelheid van de lak, de verdeling van de spanning
en de plaats van de stapel (een klein rond staafje vurehout, dat tussen
boven- en onderblad geklemd zit), die maar een tiende millimeter van zijn
plaats hoeft te raken om de klank te beïnvloeden, de manier waarop de kam
gesneden is, de hoek waaronder de snaren over de kam lopen en hun plaats
op de kam, en tenslotte de dikte van de snaren.

Bij al de bovengenoemde factoren komt dan bovendien de smaak en zelfs de
persoonlijkheid van de violist, die in zijn instrument niet slechts volume
en resonantie zoekt, maar er ook een weerspiegeling in wil zien van zijn
eigen karakter".

Er zijn dus zaken waar een vioolbouwer op moet letten, zo leert de prak-
tijk. Verder zijn de beide geciteerde heren het er over eens, dat de ta-
lenten en het gevoel van de *speler* doorslaggevend zijn voor de klank.
Natuurlijk gelden soortgelijke beschouwingen ook voor de vele andere typen
instrumenten.

Waarom klinkt een instrument zoals het klinkt? Waarom kun je een piepklein
fluitje zover weg nog horen? Dat zijn vragen waarop de natuurkunde ant-
woord kan geven (al is het nog altijd zo, dat uit die antwoorden vrijwel
geen ideale recepten voor instrumentbouw zijn af te leiden: de soms
eeuwenoude bouwvoorschriften worden nog maar zelden verbeterd door natuur-
kundige berekeningen). Met die vragen zullen we ons in dit hoofdstuk bezig
houden.

Ook zullen we aandacht besteden aan een aantal manieren waarop een toon
kan ontstaan, en manieren waarop de toonhoogte bij de verschillende typen
instrumenten gevarieerd kan worden.

Voor natuurkundige beoordeling vallen de muziekinstrumenten ruwweg in twee
groepen uiteen: de *snaarinstrumenten* (bijv. gitaar, piano, viool) en de
blaasinstrumenten (bijv. trompet, fluit, orgel). Slaginstrumenten wijken
in principe niet veel af van snaarinstrumenten, omdat een trommelvel als
een soort tweedimensionale snaar beschouwd kan worden. In een snaar plan-

ten zich transversale golven voort in één richting, langs de snaar. In een vel of een plaat treden ook transversale golven op, maar deze kunnen zich in twee onderling loodrechte richtingen uitbreiden.

Omdat een gedetailleerde bespreking van die tweedimensionale golfuitbreiding voor ons doel te ver voert, laten we de slaginstrumenten verder buiten beschouwing.

Ook elektronische versterking zal hier niet aan de orde komen. De principes, voor zover afwijkend van wat in dit hoofdstuk behandeld wordt, vind je in hoofdstuk 5 'Geluid weergeven'.

2.2 Toonvorming en overdracht

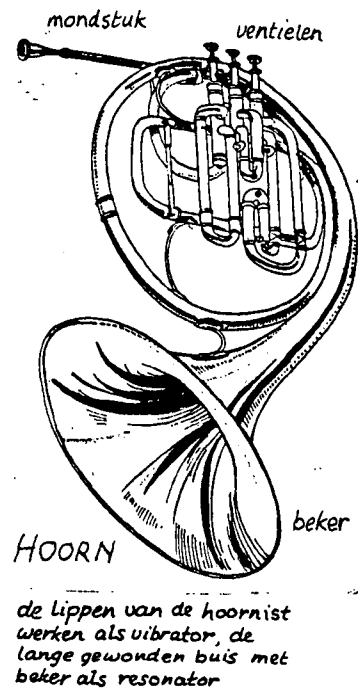
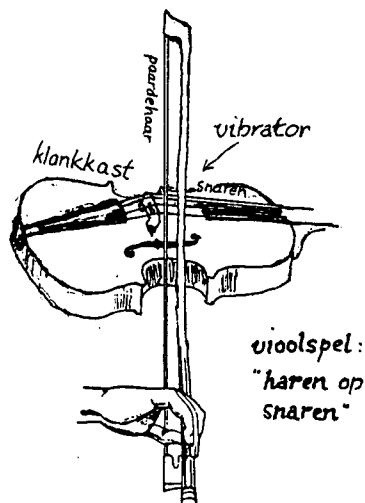
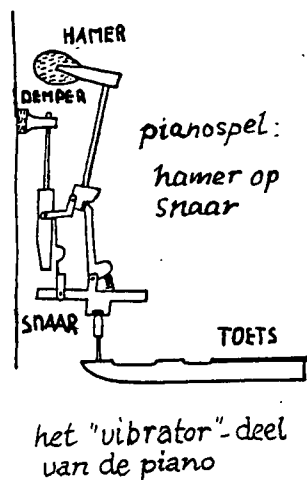
Ieder muziekinstrument, dus ook de menselijke stem, zet een bepaalde vorm van energie om in geluidsenergie. Het instrument brengt de omgevingslucht in trilling, en die trilling plant zich voort. We spreken van een *geluidsgolf* die de lucht als voortplantingsmedium heeft. De overdracht aan de omgevingslucht van de energie die de trillingsbron levert, is geen vanzelfsprekende zaak, zoals we later nog zullen zien. Bij de menselijke stem vormen de stembanden de trillingsbron, maar het geproduceerde geluid zou onhoorbaar zijn, als de combinatie van keel- en mondholte niet als klankkast tussen de stembanden en de open lucht geschakeld was. In een saxofoon brengt het riet de trilling voort, maar het is de luchtkolom in de metalen buis daaronder die saxofoongeluid ook op enkele meters afstand nog goed hoorbaar maakt.

In feite kan in ieder instrument onderscheiden worden:

- * Een *vibrator*, een onderdeel dat door zijn elastische eigenschappen of door zijn vermogen, een luchtstroom in trilling te brengen, kinetische energie omzet in trillingsenergie. Die kinetische energie wordt door de speler geleverd met behulp van een hamer, een strijkstok, een tokkelplaatje, een luchtstroom, enz. Bij sommige instrumenten (vooral de snaarinstrumenten) trilt de vibrator in bepaalde frekwenties en legt daarmee de toonhoogte vast.
- * *Resonatoren*, die de trillingsenergie overnemen in een groter volume of op een groter oppervlak, en daardoor de overdracht aan de omgevingslucht vele malen groter maken dan waartoe een losse vibrator in staat is. Het kan een kolom of een doos met lucht zijn die resoneert, maar ook een houten blad. Bij een gitaar bijvoorbeeld resoneert zowel het hout als de ingesloten lucht. In alle gevallen treden er staande golven op in de resonatoren. Bij instrumenten (m.n. blaasinstrumenten) waar de vibrator niet sterk bepalende eigen frekwenties heeft, zijn het de resonatoren die de toonhoogte vastleggen.

Het principe is dus, dat de trilling opgewekt wordt in de vibrator en overgedragen wordt aan de omgeving via de resonatoren. De variatie in soorten vibratoren en in soorten resonatoren is bijzonder groot. En al die verschillende typen hebben weer hun eigen karakteristieke voorkeuren voor bepaalde frekwenties. Uiteindelijk brengt elk instrument bij elke toon een mengsel van harmonische trillingen met allerlei frekwenties voort. De samenstelling van dat mengsel kan ook nog veranderen in de tijd dat de toon klinkt, en al die factoren bij elkaar geven aan de instrumenten hun eigen karakteristieke klank.

MUZIEKINSTRUMENTEN



Hieronder staan enkele proeven beschreven die de beide functies van een resonator verduidelijken: overdrachtsversterking en klankbeïnvloeding, kwantiteit en kwaliteit dus.

Proef 2.1 RESONANTIE EN OVERDRACHTSVERSTERKING

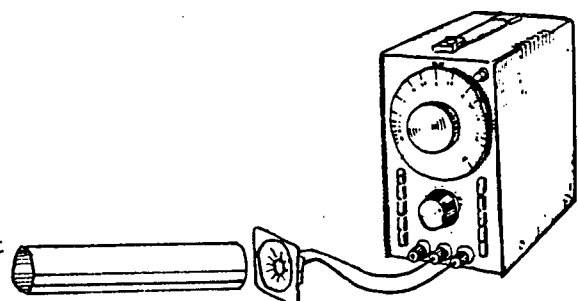
1. Bevestig een gitaarsnaar op een plankje (zie tekening); zo'n éénsnarig instrument wordt *monochord* genoemd en wordt vaak gebruikt bij trillingsproeven.



Span de snaar zover, dat hij bij tokkelen een toon voortbrengt. Vergelijk het geluidsniveau, met je oor en met een decibelmeter, met dat van een soortgelijke snaar die gewoon op een gitaar zit. Voor eerlijk vergelijken moeten de snaren natuurlijk wel met dezelfde amplitude trillen, dat kun je wel ongeveer zien. Wanneer je een viool of ander strijkinstrument tot je beschikking hebt kan de proef ook daarmee gedaan worden.

2. Verbind een luidspreker met een toongenerator en leg een kartonnen of perspex koker voor de luidspreker (zie tekening). Zoek met de frekwentieknoop een toon die sterk klinkt. Haal dan de koker weg.

Beschrijf het verschil dat je hoort en onderzoek het met een dB-meter.



MUZIEKINSTRUMENTEN

3. Laat een stemvork eerst 'los' trillen, vervolgens met de knop op een tafelblad en tenslotte op een bijbehorend klankkastje. Gebruik je oren en een dB-meter om de klankverschillen te onderzoeken.

Proef 2.2. RESONANTIE EN TOONHOOGTE

1. Doe je lippen op elkaar, span ze en blaas er tussen door. Het eerste geluid zal op een gewone wind lijken, maar met enig oefenen zal het geluid van een bromvlieg of een sportvliegtuigje klinken. De toonhoogte van dat geluid wordt beïnvloed door de spanning in je lippen en de snelheid waarmee je de lucht er door blaast. Merk op, dat je zo elke toonhoogte (binnen een bepaald gebied) kunt produceren.

Herhaal deze oefening, maar nu met een trompet-achtig instrument aan je lippen (een tuba is voor de beginnening het makkelijkst). Onderzoek de invloed die de aanwezigheid van het instrument heeft op het geluidsniveau.

Ga na of je nog steeds elke toonhoogte kunt blazen met het instrument en welke tonen worden bevoordeeld.

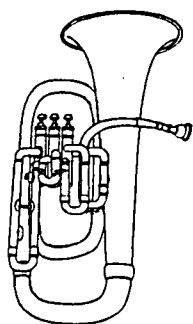
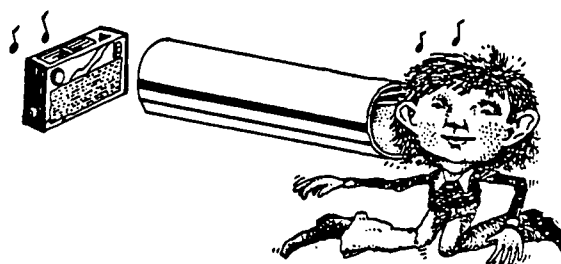
Door het indrukken van ventielen of het verschuiven van een U-buis kun je de buislengte veranderen. Onderzoek opnieuw welke toonhoogten bevoordeeld worden.

2. Haal het mondstuk uit een tuba weg en zet je mond op de pijp. Als je met je stem van de ene toon naar de andere probeert te glijden, zul je merken dat de luchtkolom je stem laat omklappen van de ene naar de andere. Op een trompet zal het ook wel lukken, als je hoge tonen maakt.

3. Stem een radiootje af tussen twee FM-stations in. Dan produceert het *ruis*: een opeenstapeling van allerlei geluiden met dicht opeen liggende frekwenties. Maak die ruis via een versterkte microfoon of een dB-meter zichtbaar op een oscilloscoop. Breng vervolgens een lange kartonnen of perspex buis voor de luidspreker van de radio en houd eerst je oor, dan de microfoon bij het andere uiteinde. Beschrijf de invloed op het geluid dat je hoort, en op de oscilloscoopweergave.

Bovenstaande proeven illustreren enerzijds hoe slecht trillingsenergie van een vibrator aan de omgeving wordt overgedragen, als er niet een geschikte klankkast of luchtkolom tussen wordt geschakeld, anderzijds hoe belangrijk zo'n resonator kan zijn in het vastleggen van de toonhoogte.

In de volgende paragrafen zullen we uitvoeriger ingaan op de werking van snaarinstrumenten en van blaasinstrumenten. Daaraan voorafgaand zullen enige natuurkundige achtergronden van geluid aan de orde komen.



MUZIEKINSTRUMENTEN

2.3 Natuurkundige achtergronden van geluid

Voor een goed begrip van de werking van muziekinstrumenten is enig inzicht wenselijk in de *overdracht van golfenergie* van het ene medium aan het andere. En omdat voor de klankkleur van een instrument *samengestelde trillingen* van belang zijn, zal ook dit onderwerp ter sprake worden gebracht.

2.3.1 overdracht van trillingsenergie

Geluid plant zich voort, dat weten we uit ervaring. De energie wordt daarbij getransporteerd in een *lopende golf*. Hoe dat in zijn werk gaat is goed te zien in een lange veer, een slinky bijvoorbeeld. Geef een tik tegen het uiteinde en de aldus veroorzaakte uitwijking of verstoring verplaatst zich langs de veer. Belangrijk is dat de veer weer stil ligt op plaatsen waar de uitwijking al langs is geweest (tenzij er een nieuwe uitwijking volgt natuurlijk). Dat betekent namelijk dat alle golfenergie getransporteerd wordt. Kennelijk neemt een winding, die door de vorige winding uit de evenwichtsstand wordt geduwd, de impuls en de energie geheel daarvan over en geeft ze ook weer geheel door aan de volgende.

Het is hiermee als met twee karretjes van gelijke massa die in elkaars verlengde staan opgesteld en waarvan de één met snelheid v tegen de stilstaande ander rijdt. Als een elastische botsing plaatsvindt, rijdt het karretje dat eerst stilstond met diezelfde snelheid v weg, en het andere karretje staat nu stil. Ook hier dus volkomen overdracht van energie en impuls. Als we honderd van die karretjes op een rij zetten, met enige tussenruimte om goed te kunnen zien wat er gebeurt en we geven kar 1 een snelheid v , dan horen we negenennegentig tikken en we zien, dat alle karretjes stilstaan, alleen kar 100 rijdt nu. En als de wrijvingskrachten nul waren, is zelfs de snelheid van kar 100 weer v . We kunnen de karren nog met veren aan elkaar knopen; als de veren identiek zijn, zullen impuls en energie die er aan de linkerkant worden ingestopt, er aan de rechterkant weer uitkomen. Net als bij de slinky. Alleen ... aan het achter eind van de rij karren-met-veren of van de slinky treedt *reflektie* op. De laatste kar mist een opvolger en rijdt verder door dan wanneer hij daar een tegenkracht had ervaren. Daardoor, wordt de laatste veer sterk uitgetrokken en dat heeft weer tot gevolg, dat de voorlaatste kar door de evenwichtsstand wordt getrokken. En die trekt weer aan de veer naar de op twee na laatste. Er ontstaat zo opnieuw een lopende golf, maar nu in omgekeerde richting. Dit proces, reflectie aan een open uiteinde, is bij een slinky duidelijk te zien. We zien door dit voorbeeld ook, dat bij een longitudinale golf een verdichting terugkeert, als er reflectie aan een open einde optreedt. Een verdunning wordt zo als verdichting gereflekkeerd.

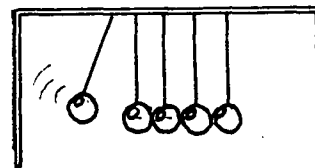


fig. 2.3.1:
Met deze kogeltjes aan dunne draadjes lukt het ook.

Ook aan een vast uiteinde treedt reflectie op. We kijken weer naar een rij karretjes met veren: het voorlaatste karretje duwt op een gegeven moment de laatste veer in, maar de laatste kar rijdt niet weg, omdat een vaste wand hem tegenhoudt. De laatste veer wordt dus sterker ingedrukt dan de andere en de voorlaatste kar wordt sterker teruggeduwd. Daardoor rijdt deze terug door de evenwichtsstand heen en de beweging verplaatst zich de andere kant op. Ook deze vorm van reflectie, waarbij een verdichting als een verdichting terugkeert, kan met een slinky geverifieerd worden.

Midden in de veer of rij karren treedt geen reflectie op, omdat, zoals we zagen, elk segment van de veer alle impuls en energie overdraagt aan het segment ernaast, in de voortplantingsrichting. Dat verandert echter, als de veer vanaf een bepaald punt van eigenschappen verandert.

Stel je eens voor, dat in onze rij met karren halverwege de massa van de karren verandert. Wat er dan gebeurt wordt al duidelijk uit een proef met twee karren van ongelijke massa. Als de kar met kleine massa beweegt en botst op een stilstaande grote, krijgt de grote een deel van de impuls en de energie, en de kleine wordt gereflekteerd (zie fig. 2.3.2).

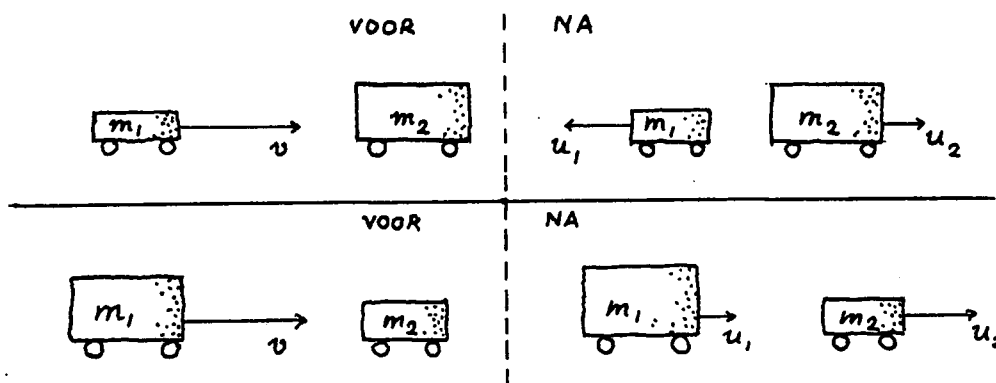


fig. 2.3.2:

Botsing van karren met ongelijke massa. De verhouding u_1/u_2 hangt af van de massa's ($u_1/u_2 = 2 \cdot m_1/m_1 - m_2$).

Als deze beide karren nu ergens in onze rij van honderd staan, zal een verdichting die van links aankomt gedeeltelijk gereflekteerd worden. De rest van de energie wordt naar rechts getransporteerd. De golf had ook van een rij grote karren naar een rij kleine karren kunnen overgaan. Ook dan was gedeeltelijke reflectie opgetreden, dat kun je nu zelf wel nagaan (zie ook fig. 2.3.2 de onderste plaatjes).

Bovenstaande (gedachten-)experimenten kunnen ook met bewegingen loodrecht op de voortplantingsrichting worden uitgevoerd. Bij reflectie van een open uiteinde van een transversale golf zal een golfberg als een golfberg terugkeren, en een dal als een dal. Bij reflectie aan een vast uiteinde verandert een berg in een dal, en omgekeerd. Ook een transversale golf zal gedeeltelijk weerkaatst worden, als in de veer de massa per meter verandert.

Gedeeltelijke reflectie treedt ook op, als in een veer vanaf een bepaalde kracht de *spankracht* anders is. Als een lopende golf aankomt bij een gedeelte waar de veerkracht ineens groter wordt, zal een vast-uiteinde-achtige reflectie optreden. Bij de overgang naar een 'slapper' deel treedt open-eind-reflectie op. De reflectie is des te vollediger, naarmate de overgang in elasticiteit groter is.

Samenvattend zien we dat aan een *discontinuïteit* in de massa per lengte-eenheid of in de spankracht van een veer reflectie optreedt in een door die veer lopende golf. Men kan voor een eendimensionale lopende golf (transversaal of longitudinaal) afleiden, dat er géén reflectie optreedt, als het *produkt van de massa per lengte-eenheid en de spankracht* niet verandert.

MUZIEKINSTRUMENTEN

De natuurkunde kent een grootheid die een maat is voor het effect dat een trillingsbron met een bepaalde heen en weer drijvende kracht heeft op een veer of een snaar. Die grootheid wordt de *impedantie* genoemd, met als symbool Z . De beweging die de trillingsbron bij zijn aangrijpingspunt veroorzaakt is kleiner naarmate de impedantie groter is.

Voor een veer of een koord met een massa per lengte-eenheid m/l en een spankracht F_s , waardoor zich eendimensionale golven kunnen voortplanten, geldt voor de impedantie:

$$Z = \sqrt{F_s \cdot m/l}$$

Met een blik op de vorige alinea kunnen we dus zeggen, dat een eendimensionale lopende golf niet gereflekteerd wordt, zolang de impedantie van het medium niet verandert. Maar bij een diskontinuiteit in het medium kan de impedantie veranderen en dan treedt reflectie op. De golfenergie passeert dus niet volledig een diskontinuiteit in het medium.

Wanneer een golf met amplitude A door een veer met impedantie Z_1 loopt en een grens met een plotselinge overgang naar impedantie Z_2 bereikt, wordt een deel van de golf gereflekteerd; dat deel heeft amplitude A_r . De golf-fysica leert dat:

$$\frac{A_r}{A} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

Aan deze formule kan men zien, dat er geen reflectie optreedt, als $Z_1 = Z_2$ en dat er volledige reflectie (eventueel met tekenomkeer) optreedt, als $Z_2 = 0$ of als $Z_2 \gg Z_1$. De bijbehorende energieën verhouden zich als het kwadraat van de amplitudes.

Deze laatste conclusie geldt ook voor eendimensionale lopende golven in het medium lucht zoals geluidsgolven in een buis. Ze geldt eveneens voor twee- en driedimensionale golven, al zien de formules voor de impedantie er dan weer anders uit.

Belangrijk is, dat je ziet, hoe weinig het voor de hand ligt, dat geluidsenergie door een muziekinstrument aan de lucht wordt overgedragen. Immers de grens tussen een muziekinstrument en de lucht eromheen is vaak een niet te verwaarlozen diskontinuiteit. En ook in het instrument zelf zitten impedantieveranderingen, met bijbehorende reflectie. Een snaar op een massief plankje klinkt niet, omdat alle geluidsenergie wordt weerkaatst en weer terug de snaar inkomt, waar de energie uiteindelijk in warmte wordt omgezet. Als de snaar over een kam loopt die op het bovenblad van een viool geplaatst is en daardoor soepel kan bewegen, is het impedantieverschil tussen snaar en kam klein genoeg om een redelijk deel van de geluidsenergie door te laten. Ook tussen kam en bovenblad, de rest van het hout en de ingesloten lucht is er steeds weer sprake van een goede impedantie-aanpassing en zo kan een goed waarneembaar deel van de oorspronkelijke trillingsenergie tot de open lucht en de luisteraar doordringen. Voor blaasinstrumenten geldt een soortgelijke analyse. Daarbij weegt echter veel zwaarder, dat de impedantie van de luchtkolom ook nog van de frekwentie van de trilling afhangt. Dat is in tegenspraak met het hele verhaal hierboven (de impedantie hing daar slechts van materiaaleigenschappen af), maar we hadden het daar ook steeds over lopende golven, terwijl in een luchtkolom staande golven optreden met duidelijke voorkeursfrekwenties. We gaan hier niet op door. Van belang is bij blaasinstrumenten de vraag: hoe krijg ik de energie van het mondstuk de pijp in en dan weer de pijp uit?

2.3.2 Fourier-analyse

In 1622 toonde de franse wiskundige Fourier aan, dat iedere periodieke functie beschouwd kan worden als de optelsom, de *superpositie*, van bepaalde sinusfuncties. Onder een periodieke functie verstaan we een functie die zich na een vast interval herhaalt. De functie $\sin x$ is er natuurlijk een heel duidelijk voorbeeld van, maar ook een zaagtand, blokfunktie, driehoek-funktie of nog grilliger patronen kunnen periodiek zijn. In figuur 2.3.3 zijn enkele voorbeelden getekend.

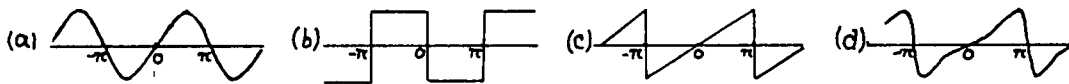


fig. 2.3.3:
Periodieke functies van t , alle met periode 2π .

- a) de sinusfunctie $f_a(t) = \sin t$
- b) de blokfunktie $f_b(t) = 1$ voor $-\pi < t < 0$
 $= -1$ voor $0 < t < \pi$, verder periodiek
- c) de zaagtandfunctie $f_c(t) = t$ voor $-\pi < t < \pi$, $f_c(-\pi) = f_c(0) = 0$, verder periodiek
- d) de combinatie $f_d(t) = 2(\sin t - \frac{1}{2}\sin 2t + \frac{1}{3}\sin 3t)$

Een trillende snaar of een trillend riet voeren wel een periodieke beweging om de evenwichtsstand uit, de plaatsfunctie van een punt op zo'n snaar is dus een periodieke functie van de tijd, maar de trilling is in de regel niet harmonisch, de functie geen sinusfunctie. De stelling van Fourier zegt nu, dat die niet-harmonische trillingen bestaan uit harmonische trillingen met verschillende frekwenties. De laagste van die frekwenties is gelijk aan de frekwentie van de niet-harmonische trilling. Die hogere frekwenties zijn gehele veelvouden van die grondfrekwentie. De snaar die tegelijk in zijn grondtoon en in een aantal boventonen trilt, voert in totaal dus een beweging uit die zich na een vaste periode herhaalt. Die vaste periode is de trillingstijd van de grondtoon.

Voor meer wiskundige details van Fouriers theorie verwijzen we naar de tekst die in een kader is geplaatst, elders in deze paragraaf.

Een zaagtandfunctie met frekwentie f_1 blijkt te zijn opgebouwd uit een reeks sinusfuncties met frekwentie f_1 , $2f_1$, $3f_1$ enz. tot oneindig hoge frekwenties toe, zij het dat de bijdrage afneemt met het rangnummer van de frekwentie. De functie die in fig. 2.3.3.d is getekend geeft het begin van de Fourierreeks van een zaagtand weer, beperkt tot de eerste drie termen.

Hoe meer termen erbij genomen worden, des te meer zal de functie op een zaagtand gaan lijken. En als deze functies tot klinken zouden worden gebracht, zou ons gehoor steeds meer een 'echte zaagtand' horen, naarmate er meer hoogfrekwente componenten (meer boventonen) worden toegevoegd. Al moeten we er bij zeggen dat ons gehoor frekwenties boven 20 kHz niet meer waarneemt, dus om een 'echte zaagtand' te horen hebben we de Fouriercomponenten boven 20 kHz niet nodig.

MUZIEKINSTRUMENTEN

Een opmerkelijk resultaat van de Fourier-analyse is ook, dat een blokvormige trilling kennelijk is opgebouwd uit een grondtoon met uitsluitend oneven boventonen (dus $f_1, 3f_1, 5f_1, \dots$). We zullen zien dat deze samenstelling overeenkomt met de resonantiemogelijkheden in bepaalde instrumentenfamilies.

Een gebruikelijke en bovendien overzichtelijke manier om de Fouriercomponenten van een samengestelde toon weer te geven is in een grafiek waarin horizontaal de frekwentie, verticaal de absolute waarde van de betreffende componenten zijn uitgezet. Zo'n grafiek wordt een *Fourierspectrum* of *spektrum* genoemd. Fig. 2.3.4 toont de spektra van de in fig. 2.3.3 afgebeelde tonen.

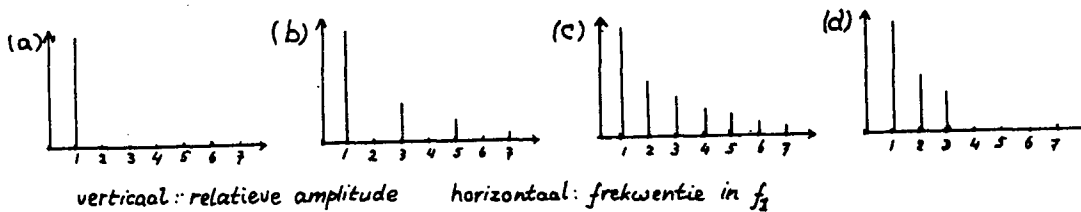


fig. 2.3.4:
Fourierspectra van (a) een sinus, (b) een blok, (c) een zaagtand en
(d) sinus met twee boventonen. Vergelijk met fig. 2.3.3.

Als $f(t)$ een functie is met periode 2π , dan is:

$$\begin{aligned} f(t) &= a_0 + a_1 \sin t + a_2 \sin 2t + a_3 \sin 3t = \\ &= a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} a_h \sin ht \end{aligned}$$

waarin $a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) dt$ (de gemiddelde waarde van f)

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \sin nt dt \quad (n \geq 1)$$

De getallen a_0, a_1, a_2 , enz. worden de *Fouriercoëfficiënten* van de periodieke functie f genoemd.

Opmerking: bovenstaande regel werkt alleen goed bij antisymmetrische functies, d.w.z. functies waarvoor $f(-t) = -f(t)$; bij andere periodieke functies verschijnen ook nog cosinussen in de Fourieranalyse.

Laten we als voorbeeld eens de zaagtandfunctie uit figuur 2.3.3.c analyseren. De gemiddelde waarde is nul, je kunt dat eventueel controleren door $f(t) = t$ in formule (2) in te vullen: $a_0 = 0$.

$$\begin{aligned} \text{Verder is } a_1 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} t \sin t dt = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} t \sin t dt = \frac{2}{\pi} [-t \cos t + \sin t]_0^{\pi} \\ &= 2 \end{aligned}$$

$$a_2 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} t \sin 2t dt = -1$$

$$a_3 = 2/3, a_4 = -2/4, \dots, a_n = \frac{2(-1)^{n+1}}{n}$$

Dus $f_c(t) = 2 \cdot \sin t - \frac{2}{2} \sin 2t + \frac{2}{3} \sin 3t - \frac{2}{4} \sin 4t + \frac{2}{5} \sin 5t + \dots$

Nog een voorbeeld (dat we niet zullen afleiden):

Voor de blokfunctie $f_b(t) = \frac{t}{|t|}$ als $-\pi < t < \pi$, $f(-\pi) = f(0) = f(\pi) = 0$, verder periodiek, vinden we:

$$f(t)_b = \frac{4}{\pi} \sin t + \frac{4}{(3\pi)} \sin 3t + \frac{4}{(5\pi)} \sin 5t + \dots$$

ofwel: voor Fouriercoëfficiënt a_n geldt $a_n = 0$ voor even waarden van n ,

$$a_n = \frac{4}{\pi \cdot n} \text{ voor oneven waarden van } n.$$

2.4 Snaarinstrumenten

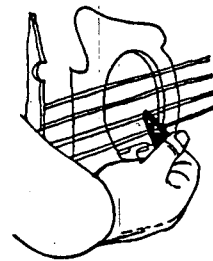
hoe ontstaat de toon?

Een gespannen snaar gaat trillen, als er op geslagen wordt, als er over gestreken wordt of als er aan geplukt wordt. Elke methode veroorzaakt weer een ander soort trilling, dat wil zeggen een trilling met andere Fourier-componenten.

Een voorbeeld dat mooi aansluit bij de theorie uit het vorige hoofdstuk betreft de aangestreeken snaar van viool of cello. Het principe berust op een bekend verschijnsel: voorwerpen die ten opzichte van elkaar stilstaan oefenen een grotere wrijvingskracht op elkaar uit dan bij een onderlinge snelheid. Zo neemt de ruw behaarde strijkstok de snaar een eind uit de evenwichtsstand mee, tot de veerkracht van de snaar het gaat winnen en de snaar terugschiet. Haren en snaren hebben dan gedurende enige tijd een snelheid t.o.v. elkaar, waardoor in die periode de wrijvingskracht veel kleiner is. Aan de andere kant van de evenwichtsstand komt de snaar tot stilstand, wordt weer beetgepakt door de haren en het proces herhaalt zich (fig. 2.4.1).

Omdat het terugschieten in een veel kortere tijd gebeurt dan de heenreis, verloopt de snaarbeweging in een 'zaagtandritme'. En we hebben hierboven gezien dat een zaagtandtrilling opgebouwd is uit een sinustrilling met dezelfde frekwentie als de zaagtand, plus een reeks boventonen met afnemende amplitude. Elk van de grond- en boventonen wekt in de snaar een staande golf op. De som van die staande golven levert een golfachtige beweging van de snaar op die niet de vorm van een sinus heeft maar een vorm zoals in figuur 2.4.2 is getekend.

De trilling is opgebouwd uit tonen met verschillende frekwenties. De toon met de laagste frekwentie wordt de *grondtoon* genoemd, de andere heten de *boventonen*. Elk van die tonen moet wel passen op de snaar, d.w.z. de bijbehorende golfvorm moet knopen hebben aan de snaaruiteinden. In fig. 2.4.3 zijn de golfvormen die horen bij de grondtoon en enkele boventonen van een



mandoline, met plectrum getokkeld

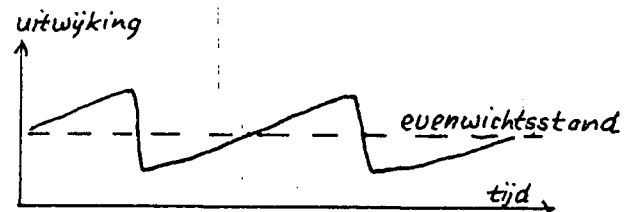


fig. 2.4.1:
Het uitwijking-tijd-diagram van een punt op een aangestreeken snaar.

MUZIEKINSTRUMENTEN

snaar getekend. Als de snaar uitsluitend in één van de tonen trilt, heeft hij steeds een sinusvorm en gaan alle punten van de snaar tegelijk door de evenwichtsstand en bereiken zij ook tegelijk hun uiterste stand. Bij een snaar echter die, zoals de aangestreeken vioolsnaar, in meer dan een toon tegelijk trilt, wijkt de vorm af van een sinusofide en bereiken de punten na elkaar hun uiterste stand. Uit stroboscopische opnamen van een aangestreeken vioolsnaar blijkt dat een 'knik' in de snaar een rondlopende beweging maakt. Ook dat is in figuur 2.4.2 aangegeven.

Je ziet daarin dat de aangestreeken plaats snel van de ene in de andere uiterste stand is, maar voor de beweging terug veel meer tijd nodig heeft. Een zaagtand dus. En als de strijkstok van richting omkeert gaat ook de knik in de snaar andersom rondlopen.

Ook de aangeslagen pianosnaar en de getokkelde gitaarsnaar trillen in een aantal tonen tegelijk, waardoor de snaren niet de vorm van de halve sinus hebben die hoort bij de grondtoon alleen.

Welke boventonen er meedoen hangt dan nog af van de plaats waar de snaar in trilling wordt gebracht. In fig. 2.4.4 is weergegeven hoe de verhouding van de afzonderlijke Fouriercomponenten samenhangt met de 'tokkelplaats' van de gitaarsnaar.

In de praktijk blijken de boventonen sneller uit te dempen dan de grondtoon, zodat de trilling na enige tijd alleen nog de grondtoon bevat en dus een zuiver sinusvormig variërende beweging uitvoert.

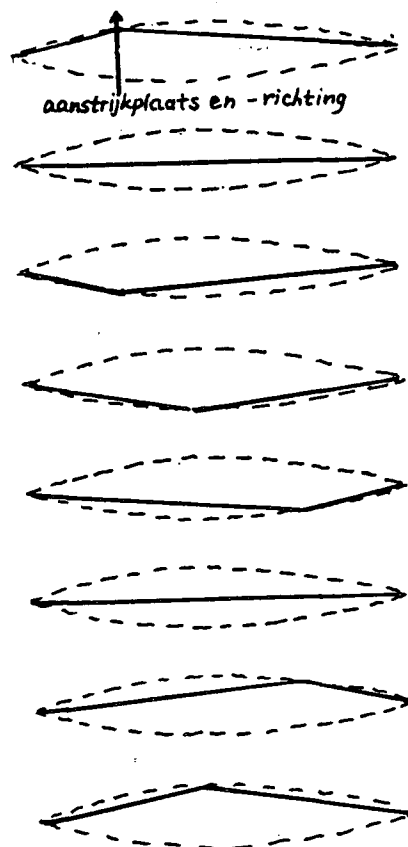


fig. 2.4.2:
Golfvorm van een aangestreeken snaar
in de loop van een trillingstijd.

Vraag 2.4.1

Leid met fig. 2.4.3 af hoe de grondfrekwentie f_1 afhangt van de snaarlengte l en de golfsnelheid v .

Doe hetzelfde voor de frekwenties f_2 , f_3 en f_4 van de eerste drie boventonen en druk deze uit in f_1 .

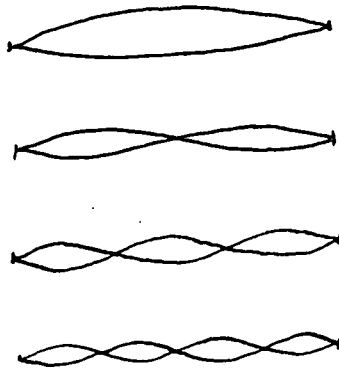
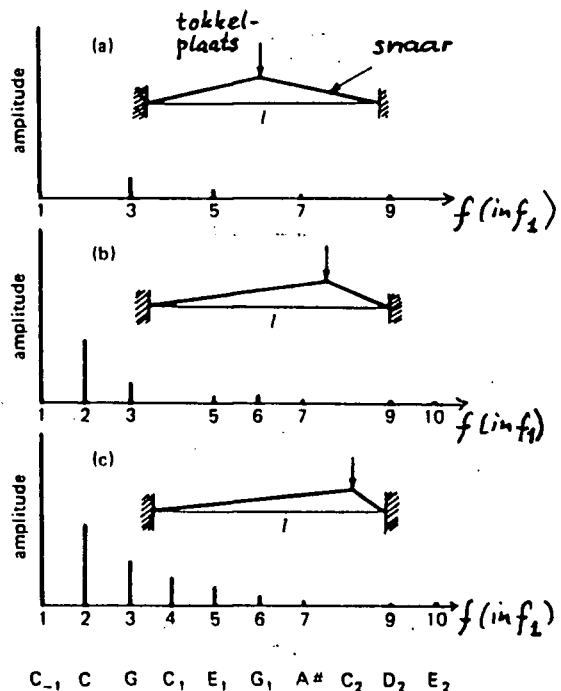


fig. 2.4.3:
Grond- en boventonen van
een sinusvormig aangedre-
ven snaar.

fig. 2.4.4:
Boventonen van een gitaarsnaar
(op C₁ gestemd), afhankelijk
van de tokkelplaats.



Proef 2.4.1 HET EFFEKT VAN SPELEN AAN DE KAM

1. Sla een gitaarsnaar op verschillende afstanden van de kam aan, beluister de klankverschillen en bekijk ze op de oscilloscoop.
2. Strijk een vioolsnaar vlakbij de kam aan en boven de toets, beluister het klankverschil en bekijk het op de oscilloscoop.

Van het effect uit proef 2.4.1 wordt in de muziek ook gebruik gemaakt. Gitaristen en violisten spelen (als ze het goed kunnen) bewust op een bepaalde plaats van de snaar om een daarbij behorende klank te krijgen. Soms wordt het zelfs voorgeschreven: 'sul ponticello' is vlakbij de kam, 'sul tasto' is meer naar het midden boven de toets.

We beschrijven enkele proeven die op eenvoudige wijze de boventonen in een trillende snaar verraden.

Proef 2.4.2 HET AANTONEN VAN BOVENTONEN DOOR RESONANTIE

De eerste versie geeft het duidelijkst resultaat, maar je moet er een piano voor hebben.

1. Als je een pianotoets aanslaat, klinkt alleen de bijbehorende toon en geen andere. Dat komt doordat elke snaar gedempt wordt met een viltblokje. Bij het indrukken van een toets wordt het blokje van de snaar getild tot je de toets weer loslaat. Druk nu voorzichtig een toets in zonder de snaar aan te slaan (of wacht tot hij is uitgedempt). Geef vervolgens een korte tik op de toets die een oktaaf lager ligt; laat die lage toets meteen weer los,

MUZIEKINSTRUMENTEN

zodat de lage toon meteen weg is. Je hoort dan, dat de toon van de ongedempte snaar is gaan klinken, hoewel die niet werd aangeslagen.

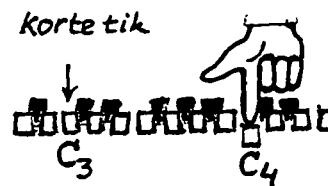
Herhaal de proef met de laagste toets ingedrukt en de hoogste aangeslagen.

Herhaal de proef met twee toetsen die op een afstand van een octaaf plus kwint, twee octaven, twee octaven plus kwart enz. liggen.

2. Sla op een gitaar bijv. een lage E aan en demp deze onmiddellijk af. De hoge E zal mee zijn gaan klinken (goed luisteren).

Herhaal de proef met andere combinaties van tonen, die een octaaf, octaaf plus kwint, enz. uit elkaar liggen.

Ga bij alle proeven die je doet na, wat de frekventieverhoudingen van de met elkaar mee-resonerende tonen zijn. Controleer, of die verhoudingen te herleiden zijn tot eenvoudige breuken als $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$ enz.



voorbeeld

Proef 2.4.3 HET MENGEN VAN EEN KLANKKLEUR

1. Speel op een piano of gitaar of (vermoedelijk met duidelijker effect) op een viool combinaties van een grondtoon en één van zijn boventonen.

Bijvoorbeeld: C_4 met $f_1 = 262$ Hz
 C_5 met $f_2 = 523$ Hz
 G_5 met $f_3 = 786$ Hz
 C_6 met $f_4 = 1046$ Hz
 F_6 met $f_5 = 1310$ Hz

Controleer of de hogere tonen versmelten met de laagste. De toonhoogte blijft die van de laagste, maar de klank verandert.

2. Eerlijker dan wat we in de proef hierboven doen is het mengen van zuivere sinustonen. Gebruik daar twee toongeneratoren en twee luidsprekers voor.

Stem de ene generator af op een bepaalde frekventie en zoek er met de afstemknop van de andere 'versmeltende' frekventies bij. Lees de betreffende frekventies af op de schaalverdeling of (nauwkeuriger) bepaal ze met behulp van een oscilloscoop. Bekijk de vorm van de trilling die bij het mengen ontstaat op de oscilloscoop.

Proef 2.4.4 HET ANALYSEREN VAN EEN KLANKKLEUR

In deze proef werken we met geluidssignalen op een bandje. Je kunt gebruik maken van opnamen van lange tonen, gespeeld op verschillende plaatsen van één instrument, bijv. een opname van de geluiden uit proef 2.4.2 of 2.4.3. De signalen worden eerst compleet zichtbaar gemaakt op een oscilloscoop door de cassette recorder op de scoop aan te sluiten. Dan voer je de signalen een bandfilter in, dat op de oscilloscoop is aangesloten. Door aan de afstemknop van het bandfilter te draaien, varieer je de frekventie van de trilling die het filter doorlaat. Op de scoop kun je zien welke frekventies sterk uit het filter komen. Meet al die frekventies en bereken hun verhouding tot de grondfrekventie.

N.B. De proef verloopt het best, als je kunt beschikken over een dubbelstraaloscilloscoop. Je kunt dan via het ene kanaal het

MUZIEKINSTRUMENTEN

oorspronkelijke signaal bezichtigen en met de andere straal de uitgefilterde componenten zichtbaar maken. (Bovendien kan het oorspronkelijke signaal de oscilloscoop triggeren, zodat je steeds een stilstaand beeld kunt houden.)

Met behulp van een toongenerator die naast sinussen ook blok-, zaagtand- en driehoekstrillingen voortbrengt kan met dit proefje zelfs een natuurkundige afbeelding van de Fourier-analyse verkregen worden.

De beweging van een snaar wordt gedempt door energie-overdracht aan de omgeving. Deze demping gaat voor de ene frekwentie sneller dan voor de andere en daardoor zal de samenstelling van de toon na een aanslag veranderen.

proef 2.4.5 VERANDERENDE KLANK, VERANDEREND BEELD

Maak het geluid van een gitaar zichtbaar op een oscilloscoop. Let daarbij vooral op het vóórkomen van scherpe piekjes in het oscilloscoopbeeld, die duiden op de aanwezigheid van boventonen. Ga na of de vorm waarin de toon eindigt een zuivere sinus is dan wel nog enkele boventonen bevat. De beelden kunnen vastgelegd worden, als je over een micro-computer met storage-scoopprogramma beschikt.

Tot slot nog enkele opmerkingen over de samenhang tussen toonhoogte en snaareigenschappen.

Uit de basisleerstof of na het maken van vraag 2.4.1 weet je dat de (grond-) frekwentie waarmee een snaar trilt omgekeerd evenredig is met de snaarlengte. Je weet ook dat de frekwentie van de golfsnelheid in de snaar afhangt. En die hangt weer van de volgende grootheden af:

- de spankracht in de snaar, F_s
- de massa per lengte-eenheid van de snaar, m/l .

In formule:

$$v_{\text{golf}} = \sqrt{\frac{F_s}{m/l}}$$

vraag 2.4.2

Controleer, of het rechterlid uit bovenstaande formule inderdaad de dimensie van snelheid heeft.

vraag 2.4.3

Beschrijf hoe het verschil in toonhoogte tot stand komt

- a. als een gitaarspeler een toonladder speelt,
- b. als een pianist een toonladder speelt,
- c. als een gitaar gestemd wordt,
- d. als een piano gestemd wordt.

Let op verschillen in lengte, spankracht en massa per meter.

vraag 2.4.4

De lage snaren van een piano en ook van strijkinstrumenten zijn omwikkeld met een dunne metaaldraad. Verklaar de functie van die omwikkeling. Beredeneer waarom het onverstandig kan zijn voor lage snaren gewoon zeer dikke metalen of nylon snaren te nemen, die dus niet omwoeld hoeven te worden. (Denk aan de relatie tussen snaarvorm en boventonen bij een trilling.)

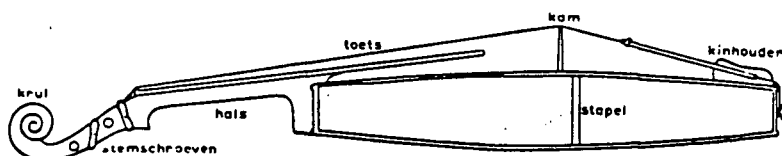
MUZIEKINSTRUMENTEN

hoe wordt de trilling overgedragen?

In par. 2.3 is al ter sprake gekomen dat de overdracht van trillingsenergie van het ene medium (de snaar) naar het andere (de omgevingslucht) geen vanzelfsprekende zaak is. Bij een abrupte verandering van de impedantie treedt reflectie van de energie op. We zagen dat die impedantie in een snaar de wortel uit het produkt was van de spankracht F_s en de massa per lengte-eenheid m/l . Die twee grootheden zijn we overigens zojuist in de formule voor de golfsnelheid in een snaar opnieuw tegengekomen, zij het in een andere schikking; het zijn inderdaad de twee belangrijke grootheden in de beschrijving van lopende golven in een medium.

In de lucht breiden de golven zich in drie dimensies uit (bolgolven) en alleen al daardoor voldoet de golfimpedantie in lucht niet aan de eenvoudige formule die voor een snaar geldt. Niettemin blijft ook hier de regel van kracht, dat de impedantie afhangt van de elasticiteit en de dichtheid van het medium. En op die twee punten verschillen een gespannen snaar en open lucht aanzienlijk van elkaar.

Een soepel houten blad of een kast met lucht draagt trillingsenergie een stuk makkelijker aan de omgevingslucht over, en dat is dan ook de functie van de klankkast, die bij ieder snaarinstrument aangetroffen kan worden. De snaren lopen over een zgn. *kam*, een houten richel of plaatje die een deel van de trillingsenergie opneemt en deze weer overdraagt aan de klankkast. Een te hoge of te lage kam bederft de vereiste spankracht in het onderliggende hout en daarmee de voor optimale overdracht vereiste impedantie. Van de kam gaat de trilling over op de klankkast, die ook weer uit diverse onderdelen bestaat. In par. 2.1 kun je een opsomming daarvan voor de viool nalezen.



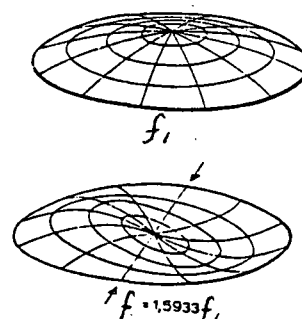
Doorsnede van een viool.

vraag 2.4.5

De kam maakt het ontstaan van staande golven mogelijk (en de plaats van de kam bepaalt de mogelijke golflengten). Beredeneer dat volkomen reflektieloze energie-overdracht van snaar naar kam dan ook ongewenst zou zijn.

Belangrijk is dat de overdracht van trillingsenergie het best verloopt bij frekwenties waarin de klankkast resoneert. We gaan op die resonantie-eigenschappen en hun samenhang met de kwaliteit van een snaarinstrument nu verder in.

Evenals een snaar in bepaalde standen kan golven, gebeurt dat ook bij een trommelvel of een buigzame plaat. In fig. 3.4.7 zijn enkele staande-golfpatronen van een oppervlak getekend. Ronde oppervlakken komen voor bij trommels (geen snaarinstrumenten) en bij een banjo. Violen en cello's hebben meer gedetailleerde vormen. Ook daarin kunnen staande golven optreden zoals figuur 3.4.8 laat zien voor zowel bovenblad (let op de invloed van de f-gaten) als achterblad van een viool.



En zoals in een snaar frekventies gekoppeld zijn aan de verschillende golfvormen, is dat ook bij deze platen en bladen het geval, al is hier geen sprake meer van een nette reeks boventonen in gehele veelvouden van een grond-frekwentie. De frekventies die horen bij de goed passende staande-golfpatronen zijn de *eigenfrekventies* van de betreffende plaat of kast. Elk onderdeel van de klankkast heeft zijn eigen serie golfvormen, maar als de complete kast gemonteerd is, beïnvloeden de onderdelen elkaar weer. Ook treden er staande golven in de ingesloten lucht op bij bepaalde frekventies.

Het totale resultaat is een klankkast die voor elke frekwentie weer in een andere mate resoneert. We kunnen een klankkast via de kam een sinusvormige trilling aanbieden, met een variabele frekwentie en een vaste amplitude, en de amplitude waarmee de kast gaat trillen meten, of het geluidsniveau op een bepaalde afstand. Bij sommige frekventies blijkt dat geluidsniveau hoger dan bij andere. Die bevoordeelde frekventies blijken eigenfrekventies van de kast te zijn, waarin blijkbaar minder energie terug de trillingsbron in wordt gereflekteerd dan buiten de resonantiegebieden.

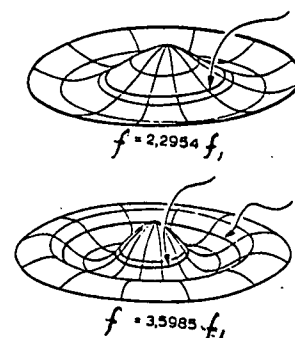


fig. 2.4.5:
Enkele golfvormen in een oppervlak.

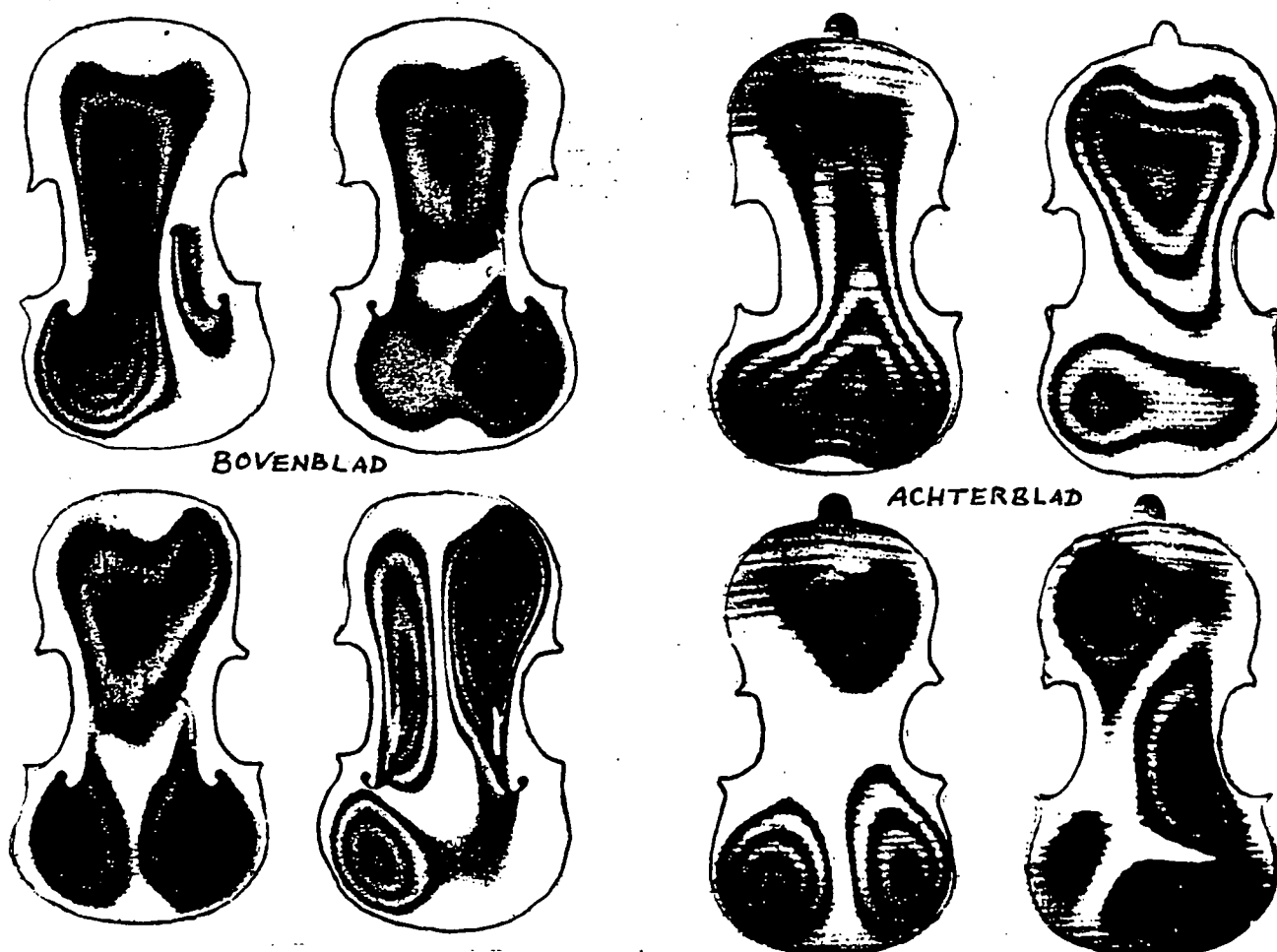


fig. 2.4.6:

Staande-golfpatronen op een los bovenblad resp. achterblad van een viool.

MUZIEKINSTRUMENTEN

Een grafiek waarin het geluidsniveau of de amplitude van de opklinkende toon als functie van de frekwentie in beeld wordt gebracht heet een *frekwentiekarakteristiek*. Figuur 2.4.6 toont frekwentiekarakteristieken van twee violen. De trillingen hierin zijn niet opgewekt met een sinusgenerator maar door de violist zelf, die zo sterk mogelijk speelde. De vorm van de karakteristieken is hier dus (net als in het normale vioolspel) ook beïnvloed door de snaareigenschappen en het contact tussen strijkstok en snaren.

In deze figuur kan het kwaliteitsverschil gekoppeld worden aan de ligging van de pieken. Die bevinden zich bij de goede viool in de buurt van frequenties van de laagste drie snaren. De ervaring leert dat die spreiding voor een aangename kleur in de vioolklank zorgt. De andere viool klinkt niet 'vanzelf' zo goed. Bewijzen dat het ene instrument beter zal klinken dan het andere kunnen echter lang niet altijd aan een frekwentiekarakteristiek ontleend worden.

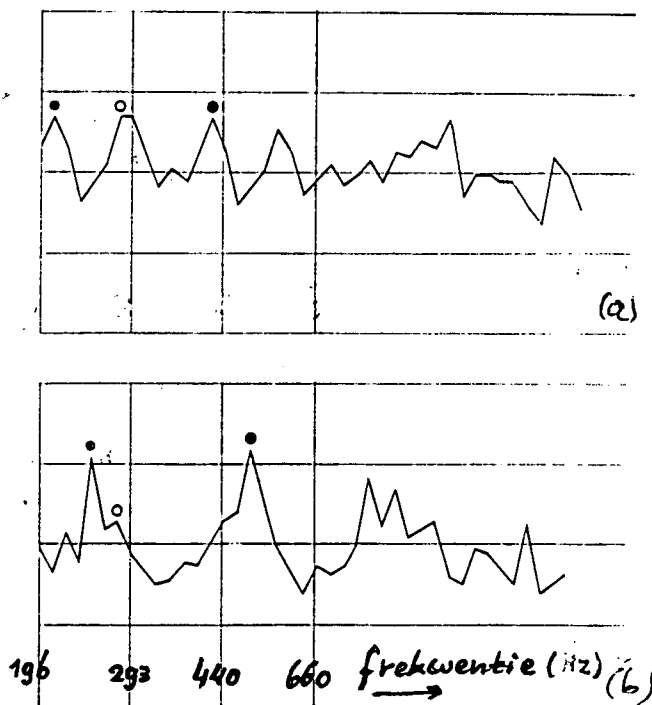


fig. 2.4.7:
Frekwentiekarakteristieken van een goede (a) en minder goede (b) viool; de verticale lijnen geven de snaarfrequenties aan, de stippen geven de pieken door houtresonantie aan, de open stip de luchtresonantie.

samenwerking tussen toonvorming en resonantie

De snaren trillen op een complexe manier, wat wil zeggen dat hun trilling een aantal frequenties tegelijk bevatten. In elke frequentie wordt een deel van de trillingsenergie overgedragen aan de kam, die daardoor in een schommelende beweging gaat trillen en door zijn contact met het onderliggende hout de klankkast in trilling brengt. Die trilling bevat nog steeds alle componenten die de snaar aanbood, zij het in een andere mengverhouding. De resonantie-eigenschappen en de mate van overdracht aan de omgeving, die ook weer frequentie-afhankelijk is, bepalen de klank die uiteindelijk bij de luisteraar aankomt.

De *toonhoogte* wordt bepaald door de snaar, de vibrator dus. Het resonerende gedeelte van de snaarinstrumenten heeft alleen invloed op de *mate van geluidsoverdracht* en op de *klankkleur*. We zullen zien dat bij blaasinstrumenten de vibrator veel minder invloed heeft en de resonatoren juist meer bepalend zijn voor klankkleur en toonhoogte.

2.5 Blaasinstrumenten

Ook bij de blaasinstrumenten kunnen we weer een trillingsbron, een vibrator dus, en een resonerend gedeelte onderscheiden. Maar waar bij het snaarinstrument de vibrator bepaalt welke toon klinkt en ook een grote invloed heeft op de mengverhouding der boventonen, zo is bij het blaasinstrument de resonator van overheersende invloed. Natuurlijk kan de luchtkolom in het instrument niet spontaan in een eigenfrequentie gaan trillen, er is zeker een energiebron nodig, maar een trillend riet of trillende lippen blijken naar een resonantiefrequentie van de luchtkolom 'getrokken' te worden. We zullen eerst op de verschijnselen in de resonator ingaan.

hoe resoneert de toon?

In de lucht die ingesloten wordt door de buis van het instrument treden staande golven op met een golflengte die bepaald wordt door de afmetingen van de buis. De golfsnelheid bepaalt weer hoe golflengte en frequentie samenhangen.

Golven treden eveneens op in het materiaal waarvan het instrument gemaakt is, en de eigenschappen daarvan hebben dan ook invloed op de klank. Maar het belangrijkste medium voor de staande golven blijft toch de luchtkolom, waarvan lengte en doorsnee samen met het type uiteindelijk de toonhoogte en de klankkleur grotendeels vastleggen.

Bij een *cilindrische buis*, een buis die overal een gelijke en cirkelvormige doorsnee heeft, ligt de zaak nog redelijk eenvoudig. We zullen het verschijnsel resonantie in een luchtkolom dan ook aan de hand van een cilindrische buis bespreken.

Een periodieke drukvariatie die aan het begin van de buis wordt veroorzaakt verplaatst zich als een longitudinale golf naar het andere eind. Omdat daar de doorsnee van de buis opeens enorm veel groter wordt (de open lucht), treedt een bijna volledige reflectie op, waarbij een drukverhoging of verdichting terugkeert als een drukverlaging ofwel verdunning. Terug bij het begin treedt weer reflectie op, waarbij een open begin de verdunning weer in een verdichting omzet en een gesloten begin de verdunning behoudt.

Als de heen en weer gaande golven elkaar versterken, ontstaat na een korte overgangsfase een staande golf in de buis. Bij een (vrijwel) gesloten begin aan de buis treedt dan een grote drukvariatie op, al oefent de trillingsbron maar een kleine kracht op de lucht daar ter plaatse uit. Dit gebeurt alleen, als de frequentie waarmee de kolom in trilling wordt gebracht een golflengte veroorzaakt die in de buis past. Een aantal golven die bij die *eigenfrequenties* horen zijn in figuur 2.5.1 weergegeven.

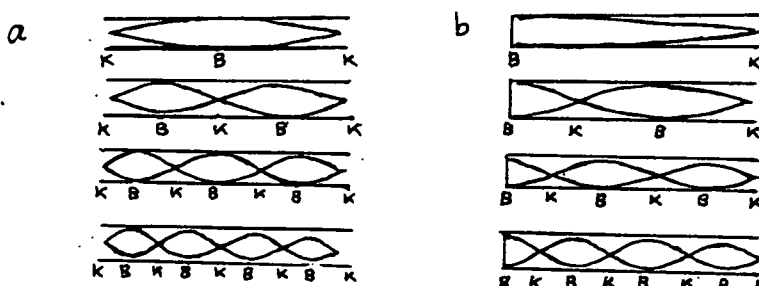


fig. 2.5.1:

Staande-golfpatronen in een buis met twee open uiteinden (a) en met één gesloten uiteinde (b); de knopen (K) en buiken (B) geven resp. minima en maxima in drukvariatie aan.

MUZIEKINSTRUMENTEN

Bij een gesloten einde is de *druk*variatie maximaal, de variatie in lucht-*snelheid* is er juist nul: de lucht staat daar stil. Bij een open einde is het omgekeerd. Daar is de luchtdruk steeds vrijwel gelijk aan de druk van de buitenlucht en varieert dus niet, terwijl de lucht er met de grootste snelheidswisseling op en neer stroomt. Zo komen 'drukbuiken' overeen met 'snelheidsknopen', en omgekeerd.

vraag 2.5.1

Teken figuur 2.5.1. over maar nu met de golfpatronen van *snelheids*-variatie.

Bij een buislengte l en geluidssnelheid v treden staande golven op bij de volgende eigenfrequenties: f_1, f_2 , enz.:

voor de open buis bij $f_1 = \frac{v}{2 \cdot l}$, bij $f_2 = 2 \cdot f_1$, $f_3 = 3 \cdot f_1$, $f_4 = 4 \cdot f_1$, enz.

voor de halfopen buis bij $f_1 = \frac{v}{4 \cdot l}$, bij $f_2 = 3 \cdot f_1$, $f_3 = 5 \cdot f_1$, $f_4 = 7 \cdot f_1$, enz.

Een toon met één van die eigenfrequenties zal dus kunnen resoneren in de buis. De toon met de laagste frequentie (f_1) noemen we weer de *grondtoon*, de andere de *boventonen*. Merk op dat de grondtoon van een halfopen buis een octaaf onder die van een even lange open buis ligt.

vraag 2.5.2

Bereken de lengte die een open orgelpijp moet hebben om de laagste toon, die van 18 Hz voort te brengen. De geluidssnelheid vind je in je tabellenboek.

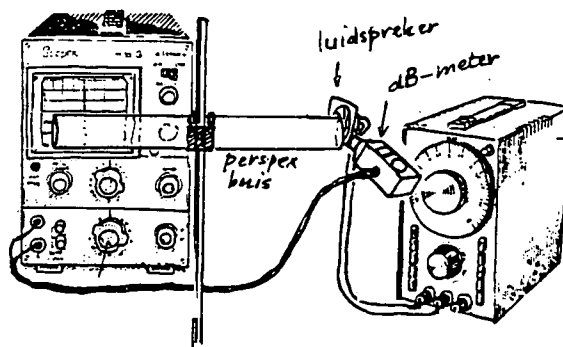
Noem het grote voordeel dat het gebruik van een halfopen pijp (gedekte pijp, zeggen de organisten) voor de basnoten heeft.

Ook heeft de halfopen buis een andere reeks boventonen dan de open. Dat is van grote invloed op de klank die zo'n buis kan voortbrengen. Vergelijk de Fouriercomponenten van een blokvormige en een zaagtandvormige golf maar. Het maakt voor de vorm van de trilling en voor de klank een groot verschil of alle boventonen meeklinken dan wel uitsluitend de oneven boventonen. Cilindrische buizen met twee open uiteinden worden gebruikt in fluiten en bepaalde typen orgelpijpen. Andere soorten orgelpijpen en klarinetten hebben cilindrische buizen die aan één zijde vrijwel gesloten zijn, en wel aan de kant van het mondstuk.

proef 2.5.1 BEPALING VAN DE RESONANTIEFREKVENTIES IN EEN OPEN BUIS

1. Bouw met een toongenerator, luidspreker, dB-meter, statief en oscilloscoop de opstelling die hiernaast is getekend. Bepaal met deze opstelling de resonantiefrekquenties van de luchtkolom in de perspex buis. Als je de luidspreker zacht zet, kun je ook op je gehoor een betrouwbare bepaling doen.

2. Verdeel wat licht gruis (bijv. kurkvijlsel, mosterd- of venkelzaadjes) over de (horizontale) buis en laat de luchtkolom resoneren. Op de plaatsen waar de lucht het snelst beweegt, wordt

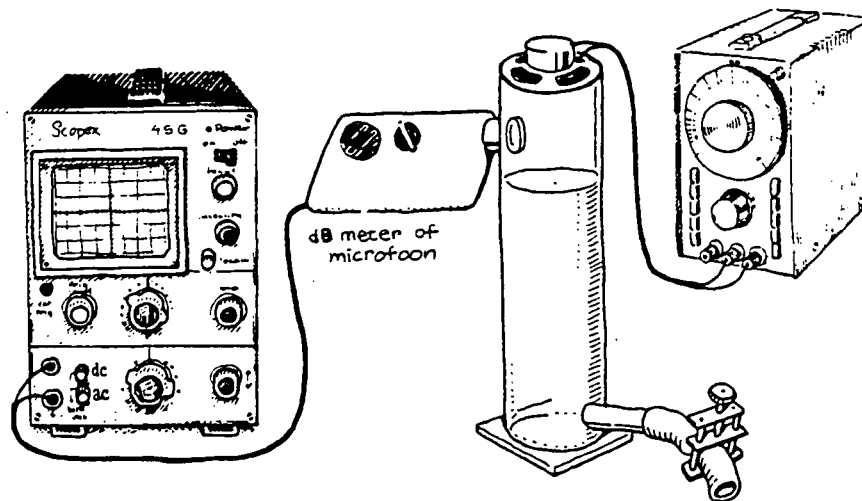


MUZIEKINSTRUMENTEN

het gruis weggeveegd. Bereken of deze plaatsen snelheidsbuiken dan wel drukbuiken zijn.

Proef 2.5.2 BEPALING VAN DE RESONATIEFREKVENTIES IN EEN HALFOPEN BUIS

Ga na hoe de resonantiefrekwentie van een luchtkolom verandert als de lengte van de luchtkolom varieert. Gebruik daarbij de hieronder getekende opstelling.



Laat de luidspreker met een bepaalde frekwentie trillen. Bepaal welke de kleinste lengte van de luchtkolom is, die met de luidspreker resoneert. Noteer frekwentie en lengte van de buis.

Herhaal deze meting bij vijf andere frekwenties. Zet de resultaten in een diagram van lengte van de luchtkolom tegen de resonantiefrekwentie.

In de beschrijving van de snaarinstrumenten is de *frekwentiekarakteristiek* al ter sprake gebracht in verband met de kwaliteit van het instrument. Bij een blaasinstrument speelt zo'n karakteristiek van de resonator een nog veel belangrijker rol: er valt uit af te lezen welke noten wel en welke niet gespeeld kunnen worden op het instrument. Ook kan uit de karakteristieken blijken, welke principiële verschillen in klankkleur er tussen de verschillende blaasinstrumenten verwacht kunnen worden.

Ook bij blaasinstrumenten trilt de vibrator in het algemeen in meer dan één toon tegelijk. Een toon die overeenkomt met een eigenfrekwentie van de resonator produceert daarin een staande golf met een veel grotere amplitude dan een golf die niet één van de eigen- of resonantiefrekwenties heeft. De frekwentiekarakteristiek geeft die amplitude weer als functie van de aandrijffrekwentie (de trilling met de aandrijffrekwentie moet wel steeds met dezelfde amplitude zijn aangeboden voor het eerlijk vergelijken). In figuur 2.5.2 staan karakteristieken afgebeeld voor een smalle cilindrische buis, open en halfopen.

MUZIEKINSTRUMENTEN

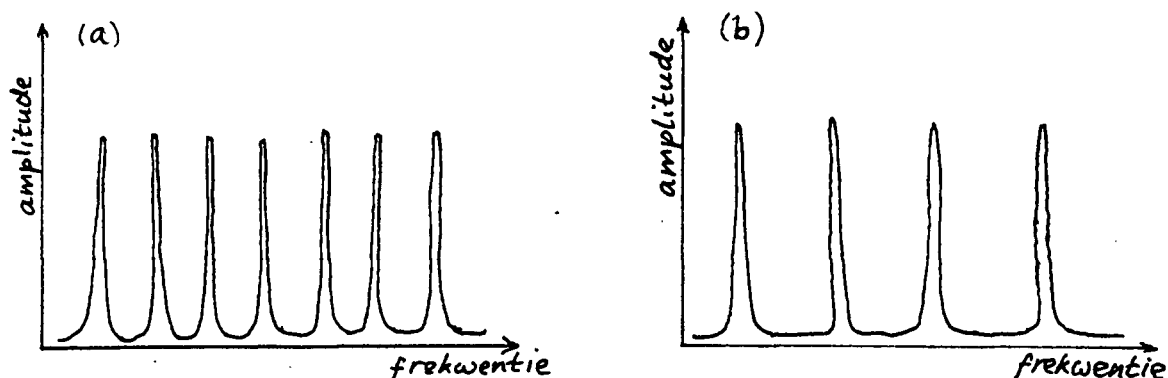


fig. 2.5.2:

Frekwentiekarakteristieken voor een smalle cilindrische buis met (a) twee open uiteinden en (b) één open uiteinde.

Een frekwentiekarakteristiek lijkt sterk op een Fourierspectrum, maar is iets anders. De karakteristiek geeft weer, in welke mate aangeboden trillingen zich in het betreffende onderdeel (klankkast, luchtkolom) kunnen ontwikkelen; bij resonantie wordt de energie uit de trillingsbron zeer effectief uit de trillingsbron overgenomen en resonantie treedt op rond de eigenfrequenties van de resonator. Het Fourierspectrum daarentegen geeft van een bepaalde trilling aan welke frequenties erin vertegenwoordigd zijn.

Vraag 2.5.3

Als aan een resonator ruis wordt aangeboden die alle frequenties bevat (witte ruis), resoneert deze slechts in een aantal tonen. Leg uit dat in dat geval het Fourierspectrum van de trilling van de trilling in de buis dezelfde vorm heeft als de frekwentiekarakteristiek van de buis.

afwijkingen van de smalle cilindrische buis

Hierboven werd gezegd dat orgelpijpen, fluiten en klarinetten cilindrische buizen hebben. Wie nu denkt dat de resonantiefrequenties dan ook keurig overeenkomen met wat beschreven is voor de cilindrische buis, komt bedrogen uit. We hebben de volgende effecten verwaarloosd:

- De verhouding tussen diameter en lengte van de cilinder speelt een rol. Een relatief grote diameter onderdrukt de hogere boventonen, waardoor het geluid van een smalle orgelpijp scherper, 'viool-achtiger', klinkt dan van een wijde, die meer een fluit-timbre heeft.
- In fluiten en klarinetten zitten gaten. De belangrijkste functie is het bieden van de mogelijkheid, de effectieve buislengte en daarmee de toonhoogte te variëren. Een gesloten gat is echter een belangrijke oneffenheid in de luchtkolom, een verbreding leidt immers tot een verandering in impedantie en dus tot enige reflectie. Experimenten hebben uitgewezen, dat het geluid van een inwendig volmaakt gladde klarinet zonder gaten niet als klarinetgeluid herkend werd! Zie figuur 2.5.3.
- Het materiaal van de wand absorbeert geluidsenergie en wel des te sterker naarmate de frequentie hoger is. Zacht materiaal doet het ook sterker dan hard. Zo klinkt een loden orgelpijp anders dan een messing exemplaar.

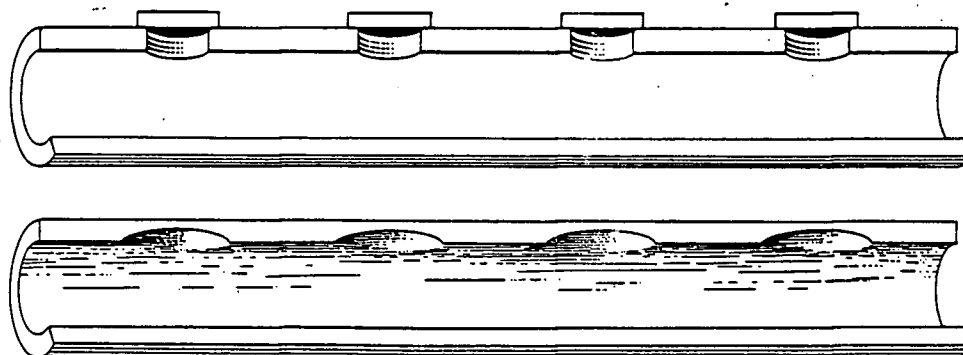


fig. 2.5.3:
Gesloten vingergaten in de wand van een pijp hebben invloed op resonantie-eigenschappen: elk gesloten gat werkt als een plaatselijke verbreding van de luchtkolom, zoals in de onderste tekening weergegeven.

Vraag 2.5.4

Hierboven is het effect van een grote diameter ter sprake gebracht. Schets de frekwentiekarakteristiek van een open cilindrische buis en het effect daarop van een grotere diameter. Doe hetzelfde voor de invloed van frekwentie-afhankelijke geluidsabsorptie door de buiswand. Geef je oordeel over de wenselijkheid van dergelijke invloeden op de frekwentiekarakteristiek.

de conische buis

Trompetten, saxofoons, hobo's en hun familieleden hebben geen cilindrische buis, maar zijn soms voor een bepaald gedeelte conisch: de diameter neemt regelmatig toe over de lengte van de buis. Op het eind zit dan nog vaak een sterk uitwaaiende beker. Dit soort afwijkingen van de cilindervorm heeft een enorme invloed op de frekwentiekarakteristiek van de resonerende luchtkolom. Zo heeft een smalle conische buis, gesloten aan de top, open aan de bodem, resonantiefrekwenties bij *alle* gehele veelvouden van de grondfrekwentie, die bovendien gelijk zijn aan de frekwenties van een open cilindrische buis. Terwijl een klarinet met zijn cilindrische en aan een zijde gesloten buis alleen *oneven* boventonen kan spelen, brengt een hobo, aan één zijde gesloten maar met een conische vorm, ook *even* boventonen voort. Echter, zelfs het feit dat een hobo niet echt in een spitse punt uitloopt maar een afgeknotte kegel is, verstoort het al: voor de hogere frekwenties schuiven de pieken weer naar de oneven plaatsen toe, zie fig. 2.5.4.

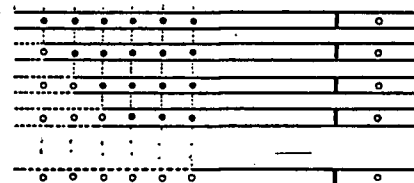
Vraag 2.5.5

Een fluit heeft vingergaten in de onderste helft van de buis. Hoe meer gaten er van onderaf gerekend geopend worden, des te hoger wordt de toon

die de fluit produceert. De hoogste noot klinkt, als alle gaten in de onderste helft geopend zijn en deze klinkt een octaaf hoger dan de toon van een geheel gesloten buis.

a. Beredeneer waarom dit zo is.

Toch kunnen op een fluit meer dan één octaaf aan noten gespeeld worden. Voor het volgende octaaf wordt de fluit namelijk 'overgeblazen' wat wil zeggen dat bij elke buislengte (horend bij een bepaald aantal geopende gaten) de eerste boventoon geblazen wordt.



MUZIEKINSTRUMENTEN

b. Bereken waarom de eerste boventoon van een toon op een fluit een octaaf hoger klinkt dan de grondtoon.

De fluitist kan zelfs nog een 'register' hoger gaan door de serie tweede boventonen aan te blazen. Voor de hobo en de fagot gelden dezelfde technieken.

c. Bereken dat 1) de vingergaten van een *klarinet* het onderste *tweede* deel van de buis moeten beslaan en dat 2) het 'middenregister' van een klarinet niet een octaaf maar een octaaf plus een kwint boven het 'lage register' ligt.

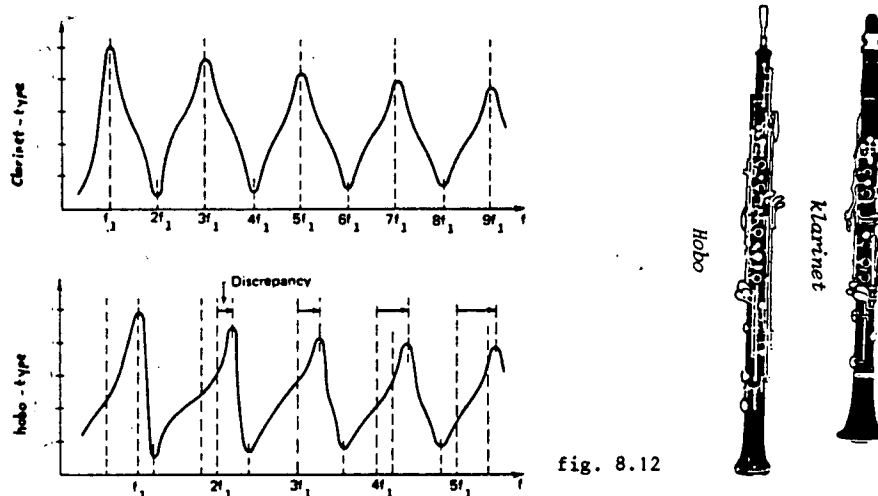


fig. 8.12

fig. 2.5.4:

Frekventiekenmerken van een klarinetbuis (boven) en een hobobuis (onder). De klarinet resoneert in oneven boventonen (halfopen cilinder), de hobo ook in de even boventonen, maar met toenemende frekwentie neemt de afwijking t.o.v. gehele veelvouden van de grondfrekwentie toe.

het effect van een beker

De wijd uitlopende beker van de trompetfamilie (trompet, trombone, hoorn, tuba) geeft een reflectie van geluidsgolven die overeenkomt met die van een gesloten uiteinde. Gevolg is dat de pieken in de frekwentiekenmerken, die bij een halfopen cilinder bij de oneven boventonen liggen, alle opschuiven in de richting van de grondtoon en daardoor terecht kunnen komen op de plaatsen van de open-pijp-boventonen. Bovendien is die sterke reflectie selectief en werkt alleen voor de eerste tien à vijftien boventonen. De energie van de hogere tonen wordt zonder frekwentievoorkeur uit het mondstuk opgenomen en naar buiten gestraald. Wanneer deze hoge tonen als boventonen in een stabiele trilling van de lippen aanwezig zijn, komen zij de trompet dus makkelijker uit dan de lagere boventonen, die immers aan de beker worden gereflekterd. Vandaar de scherpe klank van de trompet; het Fourierspektrum van het geluid buiten de trompet ziet er dan ook heel anders uit dan dat binnenin waar geen hoogfrekwente pieken te vinden zijn. Voor hoge tonen werkt de trompet als een frekwentie-onafhankelijke megafoon. Dat wordt een nadeel, als de speler zeer hoge noten wil spelen, met een *grondtoon* van hoge frekwentie dus. De trompet zal niet in die toon resoneren en hem dus niet stabiliseren. Om dan een strakke toon te kunnen spelen moet de speler een zeer goede beheersing van zijn of haar lipspanning hebben, die moet namelijk volkomen constant zijn. Soms wil een hand in de beker dan weer

helpen. De buis wordt dan korter (pieken gaan naar hogere frekventies) en het beker-effekt wordt verminderd (er rijzen weer pieken boven de vijftiende boventoon op).

In figuur 2.5.5 zijn de frekwentiekarakteristieken van een trompet zonder en een trompet met beker getekend. Ze zijn opgenomen met een sinusgenerator in plaats van een echt mondstuk, om alleen het effect van buis en beker te kunnen bestuderen.

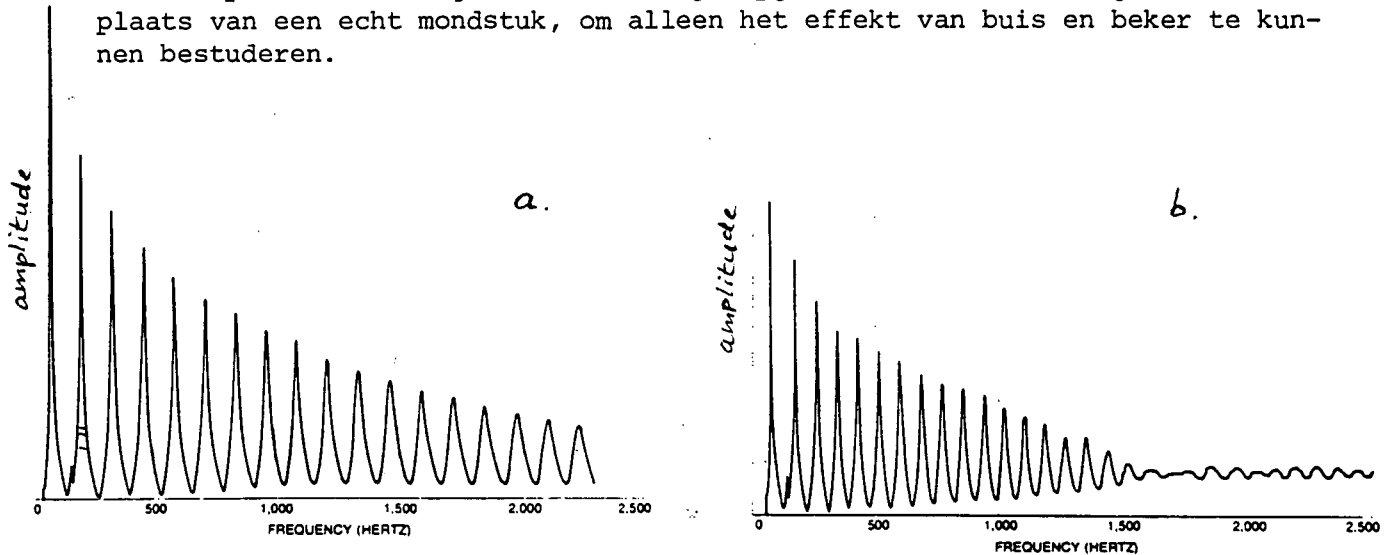


fig. 2.5.5:
Karakteristieken van een trompetpijp (cilindrisch, 140 cm lang) zonder (a)
en met (b) beker.

Het belang van de bekervorm blijkt ook bij baroktrompetten of andere koperinstrumenten die geen wijd uitlopende maar meer trechtervormige beker hebben. Zij zijn veel geschikter voor het spelen van hoge noten en presteren bij lage noten minder.

Ook het mondstuk heeft invloed op de frekwentiekarakteristiek en de vorm ervan is dan ook van belang voor de klank van een hoorn of trompet. Zonder op de oorzaken in te gaan presenteren we een voorbeeld van de invloed die zo'n mondstuk kan hebben, in figuur 2.5.6.

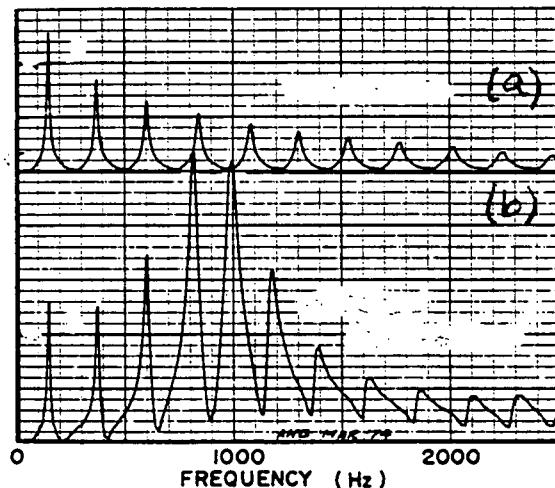
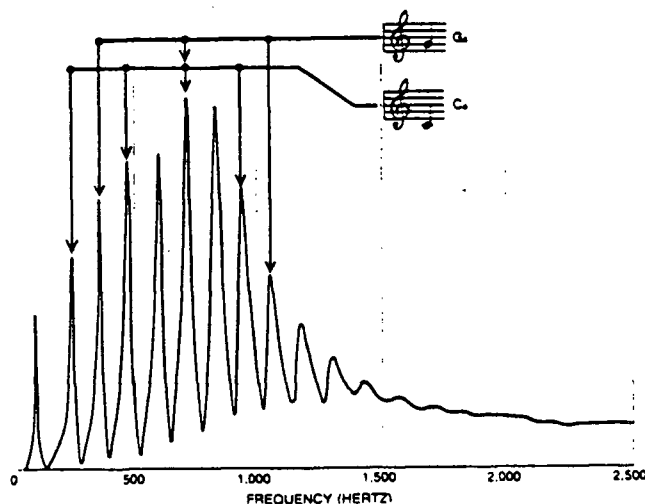


fig. 2.5.6:
Karakteristieken van een trompetpijp
zonder (a) en met (b) mondstuk.

MUZIEKINSTRUMENTEN

Een complete trompet heeft dan tenslotte een frekwentiekarakteristiek die door mondstuk, pijp en beker bepaald wordt. Figuur 2.5.7 geeft de karakteristiek voor de trompet als geheel.

fig. 2.5.7:
Frekwentiekarakteristiek van een trompet; van twee noten is de ligging van grond- en boventonen aangegeven.



Mocht de suggestie gewekt zijn dat bekera alleen bij koperblaasinstrumenten voorkomen, dan spreken we dat nu tegen. De beker van een saxofoon is niet kinderachtig. Bescheidener zijn hobo en klarinet. De althobo heeft een beker waar een ei in vast lijkt te zitten. Dat is gelukkig niet zo, maar de eivorm is wel medeverantwoordelijk voor de melancholieke klank van dit instrument (luister eens naar zijn solo's in de symfonie 'Van de Nieuwe Wereld' van A. Dvořák).

stemmen en spelen

In de frekwentiekarakteristiek van een blaasinstrument liggen de pieken weliswaar op gelijke afstanden, maar dat wil nog niet zeggen, dat de bijbehorende noten een toonladder vormen. In hoofdstuk 1 is al ter sprake gebracht, dat de toonafstanden zoals wij ze horen niet met het verschil maar met de verhouding tussen de bijbehorende frekwenties samenhangen. Als de pieken in de karakteristiek al een reeks noten met hele, of liever nog halve, toonsafstanden opleveren, is dat een kwestie van geluk.

Het spelen van toonladders wordt mogelijk gemaakt door de buislengte te variëren. Bij houtblazers en saxofoons gebeurt dit door gaten in de buiswand te openen waardoor daar een abrupte grote impedantieverandering optreedt, alsof de buis er eindigt. Bij de trombone wordt een U-vormige buis in- of uitgeschoven. Bij de overige koperinstrumenten worden met ventielen één of meer extra stukken buis aan de oorspronkelijke toegevoegd.

Elk blaasinstrument bestaat uit onderdelen die op elkaar geschoven zijn. Dat schept ook de mogelijkheid tot stemmen: het instrument kan binnen bepaalde grenzen korter of langer gemaakt worden.

Vraag 2.5.7

Vroeger (maar ook nu nog, bijv. bij 'authentieke' uitvoeringen) werden dikwijls koperinstrumenten met een vaste buislengte gebruikt.

Dat beperkte het aantal speelbare tonen nogal.

Geef namen en frekwenties van de tonen die geproduceerd kunnen worden op een hoorn die als laagste noot een C₂ heeft ($f_1 = 65,4$ Hz); beschouw de hoorn als een buis met twee gesloten uiteinden (mondstuk en beker), dus met even en oneven boventonen.

MUZIEKINSTRUMENTEN

Overigens: samenklanken van dit soort 'natuurtonen' worden vaak als 'Hornklang' herkend, zelfs als ze bijv. op violen gespeeld worden. Daarmee wordt in romantische muziek vaak een jachtsfeer opgeroepen.

Vraag 2.5.8



notenvoorbeeld van een samenklank die aan hoorngeschal doet denken

Ga met je tabellenboek na hoe groot de invloed van een temperatuurstijging van 10°C naar 20°C op de frekwentie is. Denk aan buislengte en aan golfsnelheid.

hoe ontstaat de trilling?

We hebben al gezien dat de blaasinstrumenten onderscheiden kunnen worden in de groep met een tweezijdig open buis en de groep met een aan één zijde gesloten buis. Bij de eerste groep, de fluitachtigen, waar ook een bepaalde groep orgelpijpen bijhoort, zal bij resonantie een snelheidsbuik ontstaan in het mondstuk. Dat wil dus zeggen dat de lucht er grote snelheidsvariaties ondergaat. Bij de tweede groep, de riet-instrumenten, koperinstrumenten en ... de menselijke stem, treden aan het begin van de luchtkolom juist grote drukvariaties op.

Een snelheidsvariatie kan ontstaan wanneer een luchtstroom met hoge snelheid tegen een scherpe rand geblazen wordt. Er ontstaan dan reeksen luchtwerfels (zie figuur 2.5.7). Het gevolg is dat het grootste deel van de luchtstroom op en neer gaat klappen van de linkerkant naar de rechterkant van de scherpe rand en terug. Als nu de ene helft in verbinding staat met een buis en de andere met de buitenlucht, dan zal in de ene helft van de periode lucht de buis in worden geblazen en de andere helft van die periode gaat de lucht langs de buis weg, waardoor bovendien nog lucht uit de buis meegezogen wordt (zie figuur 2.5.8). Er treedt dus een wisselende luchtstroom op, de buis in - de buis uit.

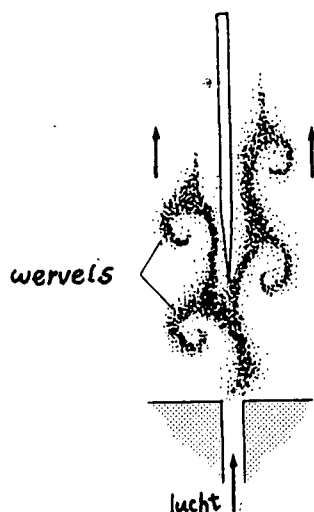
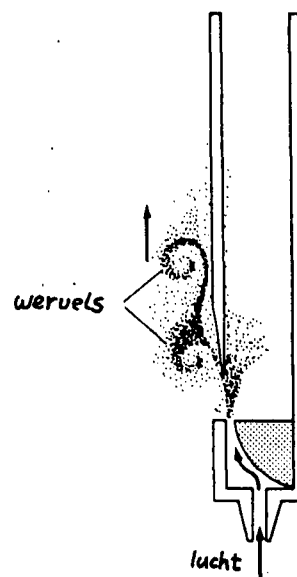


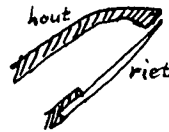
fig. 2.5.8:
Het ontstaan van wervels aan een scherpe rand.

Fig. 2.5.9:
Het ontstaan van een trilling aan de beginopening van een open orgelpijp.



MUZIEKINSTRUMENTEN

De frekventie van de trilling die zo ontstaat hangt af van de snelheid van de lucht en de afstand van luchtspleet tot rand. Maar bij resonantie in een achterliggende buis hebben de wervels geen keus meer: de trilling krijgt de betreffende resonantiefrekventie opgedrongen. Bij klarinet en saxofoon bestaat het mondstuk uit een spits toelopende kop, die op een smalle spleet na door een elastisch riet wordt afgesloten. Bij hobo en fagot sluit een pijpje met een dubbel riet de opening van de buis af. De speler neemt het mondstuk met riet in de mond en verhoogt de druk in de mondholte en daarmee ook binnen in het mondstuk. Die drukverhoging reist de buis in en tegelijk sluit het riet door de toegenomen overdruk in de mondholte de toegang tot het instrument af. Een eventuele luchtstroom langs het riet versterkt dat effect (stromende lucht heeft een lagere druk dan stilstaande, wat je eenvoudig kunt controleren door langs een vloeipapiertje te blazen). Als de drukverhoging door reflectie achter in de buis weer terug is in het mondstuk, wordt het riet weer opengeduwd en kan het proces zich herhalen.



doorsnee door
klarinetmondstuk



doorsnee door
hobomondstuk

De gang van zaken is hier nogal globaal beschreven, maar het belangrijkste kun je je hopelijk voorstellen: in het mondstuk ontstaat een trilling met grote *druk*variatie en kleine snelheidsvariaties en één of meer eigenfrekwenties van de buis. De buislengte bepaalt in overheersende mate welke grondtoon en boventonen kunnen klinken. Naarmate de frekventie hoger wordt gaan de eigenschappen van het mondstuk (afmetingen en materiaal van het riet), de lipspanning en de blaassnelheid zwaarder wegen. Riet en speler hebben dus zeker invloed op de klankkleur en ook op de hoogte van de noot (d.w.z. de frekventie van de grondtoon die bij de noot hoort).

Sommige orgelpijpen hebben een dubbel riet met daarover heen een windkap, een luchtkamer waarin de benodigde overdruk heerst. Een doelzak bestaat uit een zak met lucht waar een aantal 'hobo's' tegelijk insteken en die met de elleboog tegen het lichaam van de speler gedrukt wordt, waardoor ook zonder dat de speler blaast nog geluid wordt voortgebracht. Ook de toonvorming door de lippen van een trompettist of de stembanden van een zangeres verloopt op een soortgelijke wijze als hierboven voor de rietinstrumenten is beschreven, zij het dat zij een grotere invloed op de toonhoogte hebben dan een riet: lippen en stembanden hebben een grotere massa).

Het Fourierspektrum van de trilling in het mondstuk bepaalt het aanbod van tonen aan de resonerende luchtkolom, de frekwentiekenarakteristiek van die kolom bepaalt welke tonen een grote amplitude krijgen.

Instrumenten met een tweezijdig open buis resoneren met een snelheidsbuik in het mondstuk en worden dus 'fluitachtig' angeblazen. Instrumenten met een halfopen buis resoneren met een drukbuik in het mondstuk, dat met een trillend riet of trillende lippen kan worden afgesloten.

Vraag 2.5.8

Een blazer moet tijdens het spel af en toe een 'komma maken' om adem te kunnen halen. Sommige blazers ademen tijdens die komma snel weer in, andere ademen eerst nog flink uit en dan weer in. Beredeneer tot welke groep respectievelijk fluitisten en hoboïsten horen.

Vraag 2.5.9

Als een trompettist zachtjes speelt (*pianissimo*), trillen haar lippen vrijwel sinusachtig, dus in één toon, de grondtoon van de betreffende noot. Bij toenemende geluidsterkte (*crescendo*) verandert de liptrilling zodanig, dat er steeds meer boventonen bijkomen. Kijk nu nog eens naar figuur 2.5.7, de karakteristiek van een trompet. Daarin zijn met pijltjes aangegeven de grond- en boventonen van de lage noot C₄ en de iets minder lage noot G₄. Bedenk dat een piek betekent: als de lippentrilling een toon van die frekwentie bevat, dan wordt die door de trompet gestabiliseerd en wel des te sterker naarmate de piek hoger is.

Verklaar nu waarom het voor een trompettist moeilijk is de lage C₄ *pianissimo* te spelen, terwijl dat bij een grotere geluidsterkte makkelijk gaat. Verklaar ook dat de noot G₄ ook bij *pianissimo* spel makkelijk speelbaar is.

Wat verwacht je voor speelbaarheid voor noten met een grondfrequentie van meer dan 1200 Hz?

2.6 *Herkenning van instrumenten en klinkers*

De titel van deze paragraaf suggereert dat klinkers (A, E, I, OE, enz.) zich als muziekinstrumenten gedragen en op dezelfde wijze onderscheiden worden. Dat is grotendeels juist.

Instrumenten kunnen we aan de klank herkennen. Een zeer belangrijk onderdeel van die herkenning vormen de *beginklank* en de verandering daarvan naar een stabiele eindklank.

beginklank

De beginklank is meestal een andere dan wat er even later ('even' kan enkele milliseconden betekenen) klinkt, omdat de verschillende tonen in het Fourier-spectrum van de vibratortrilling in een verschillend tempo uitdempen. Dit verschijnsel is al genoemd bij het bespreken van de gitaar, maar speelt bij alle instrumenten een rol.

Proeven met bandopnamen waarop bijvoorbeeld de beginklank van een viool naadloos aan de vervolglank van een trompet gelast werd maakten duidelijk, dat de beginklank een zwaarwegende factor in de instrumentherkenning speelde: proefpersonen herkenden een viool, al klonk die op de bandopname maar gedurende een tiende procent van de tijd.

In proef 2.4.5 heb je het veranderende oscilloscoopbeeld van de gitaarklank kunnen zien. Als de school zou beschikken over een frekwentie-analysator (gezien de prijs onwaarschijnlijk), zou je een continu overzicht over het Fourierspectrum van de gitaarklank kunnen hebben. Dat spectrum zou beginnen zoals getekend in de onderste figuur van fig. 2.4.4 en al snel zouden de piekjes bij de hogere frekwenties wegzakken; tenslotte zou de laagste piek overblijven en langzaam uitdempen.

MUZIEKINSTRUMENTEN

Vraag 2.6.1

Hoe ziet de trilling eruit als functie van de tijd, als het Fourier-spectrum tot één piek is teruggebracht?

formanten

Bij instrumenten die in het stabiele vervolgdeel van de klank een Fourier-spectrum met meer dan één piek hebben gaat voor de herkenning de vorm van de frekwentiekarakteristiek een belangrijke rol spelen. Een frekwentiekarakteristiek heeft pieken zoals in de figuren 2.5.5 t/m 2.5.7 goed te zien is. Wat vooral fig. 2.5.7 goed demonstreert is dat de hoogte van die pieken op een markante manier verloopt. In het geval van de trompet heeft de omhullende van die pieken de vorm van een bult die tussen 0 en 800 Hz opkomt en dan snel inzakt. Zo'n hobbel in de frekwentiekarakteristiek wordt een *formant* genoemd. De trompetkarakteristiek heeft dus een formant rond 600 Hz, zie fig. 2.6.1. De noten die een trompet speelt hebben niet allemaal dezelfde verhouding tussen grond- en boventonen, al zou de trilling in de lippen van de speler ze wel steeds in dezelfde verhouding aanbieden. De karakteristiek laat zien, dat van noten met een lage grondtoon, bijv. 261 Hz de C₄), een flink aantal boventonen versterkt kan worden, meer dan de grondtoon zelf. Maar van een noot met een grondtoon hoger dan zo'n 650 Hz kan de eerste boventoon al kansarm genoemd worden.

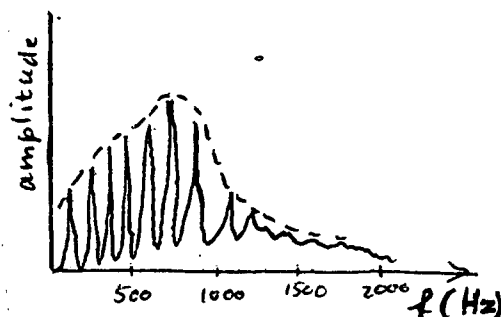


fig. 2.6.1:
Karakteristiek van een trompet;
er is één formant aanwezig.

Vraag 2.6.2

Als we een bandopname op een twee maal zo hoge snelheid afspelen dan waarmee hij werd opgenomen, horen we de tonen allemaal met een verdubbelde frekwentie.

a. Leg uit hoe dit komt.

b. Leg uit waarom een instrument bij zo'n weergave wel een octaaf hoger klinkt, maar niet klinkt als hetzelfde instrument dat een octaaf hoger *speelt* en met normale snelheid wordt weergegeven. (Het zou anders een goede manier zijn om virtuositeit voor te wenden, denk ook aan snelle loopjes!)

Fig. 2.6.2 laat een drietal karakteristieken zien van de menselijke stem (middelste kolom afbeeldingen). Links daarvan zie je welke standen van het keel-mond-kanaal met de karakteristieken overeenkomen en rechts staat het oscilloscoopbeeld van de klank bij een grondfrekwentie van ca 500 Hz. De drie klanken zijn even hoog (zelfde frekwentie van de grondtoon), maar klinken anders, resp. als IE (riet), E (pet) en OE (hoed). De karakteristiek van de menselijke stem bevat meerdere formanten en hun ligging en hoogte kunnen door de stand van tongbasis, tongpunt en lippen worden beïnvloed. De bijbehorende klanken blijken zeer kenmerkend en herkenbaar te zijn.

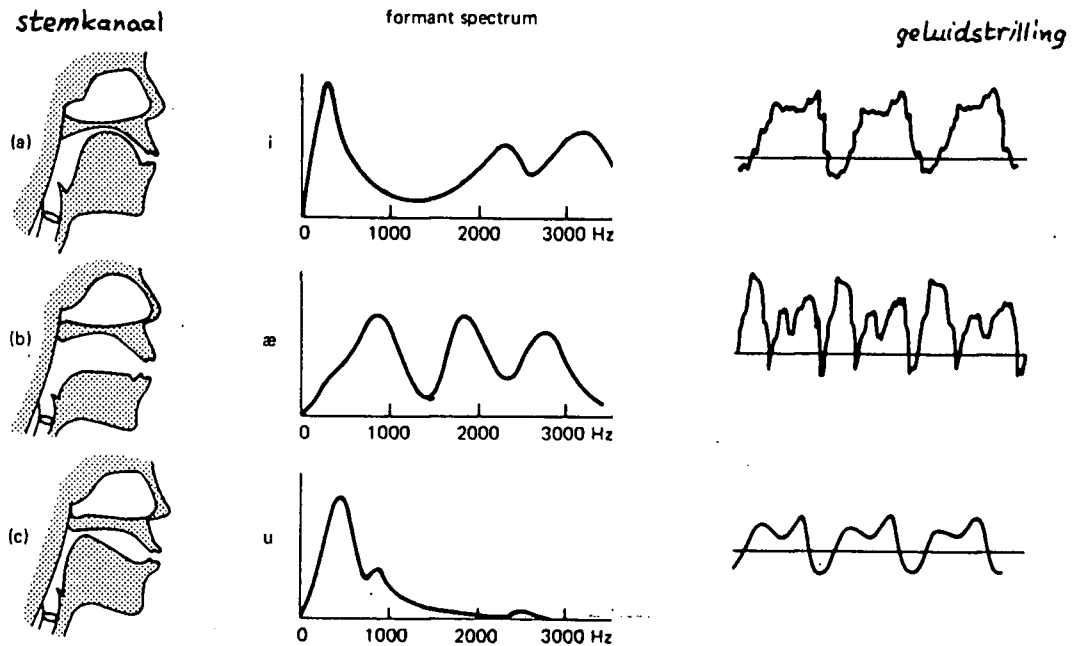


fig. 2.6.2:
Drie verschillende standen van keel en mond leiden tot drie verschillende frekwentiekaracteristieken. In de middelste tekeningen zijn de omhullende krommen van de karakteristieken weergegeven, waardoor de ligging van de formanten duidelijk is. Rechts zijn de oscilloscoopbeelden getekend bij een grondtoonfrequentie van ca 500 Hz.

Vraag 2.6.3

Leg uit waarom het zingen van hoge noten op de ene klinker meer moeite kost dan op de andere.

2.7 Tot slot

Wanneer de zangeres of de pianist in een zaal muziek gaat maken, worden zij, in de kille ogen van de natuurkundigen, elk weer opnieuw trillingsbron in een resonerende ruimte. De geluidsenergie wordt gereflekteerd, interfereert, valt wellicht in knopen en buiken uiteen, galmt na, en bereikt voor een deel de kleine trommelvliesjes van de luisteraars. Die trommelvliesjes raken in een complexe trilling, die verder het oor in gaat. Wat er in oor en zaal allemaal gebeuren kan, wordt in de volgende hoofdstukken beschreven.