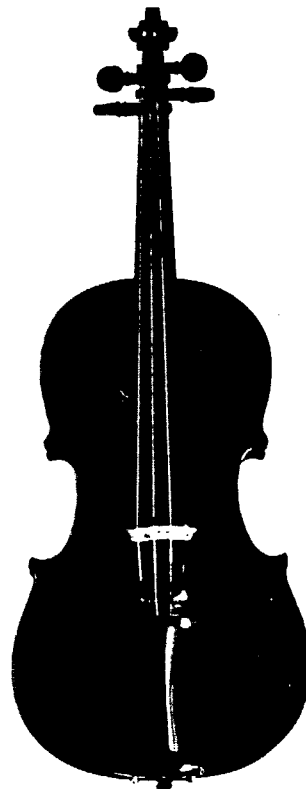


lerarenhandleiding
apparatuurgids

Muziek

Een lessenserie waarin de leerlingen

- kennis maken met taal en meetmethoden van natuurkundigen op het gebied van geluid en muziek
- onderzoek doen aan muziekinstrumenten, het eigen gehoor, akoestiek en audio-apparatuur
- een verslag maken over een keuzeonderzoek



Experimentele uitgave voor de vierde klas HAVO



© 1985 Rijksuniversiteit Utrecht
tweede (herziene) druk

Deze handleiding maakt deel uit van experimenteel lesmateriaal. Overname of referentie uitsluitend na toestemming van de medewerkers van het PLON, Lab. Vaste Stof, Postbus 80.008, 3508 TA Utrecht, tel. 030-532717.

Voorwoord	3
Plaats en karakter van het thema	4
1. De plaats van het thema in de cursus	4
2. Achtergrond en verantwoording van de themakeuze	4
3. Ervaring met het thema Geluidspatronen	5
4. Globale opzet	5
Lesmateriaal	7
Leerstof, vaardigheden en beginsituatie	8
Lessenplan	10
Ervaringen	12
Opmerkingen per hoofdstuk	13
1. Oriëntatie	13
2. Muziekinstrumenten	15
3. Luisteren naar muziek	20
4. Akoestiek	28
5. Weergeven van muziek	37
6. Muziek naar keuze	40
Literatuur	42
Bijlagen	43
D1 Samenvatting thema Muziek	43
D2 Uit het EPEP: het gebied 'Geluid en Muziek'	45
D3 Persoonlijke Gehoor Beschrijving (P.G.B.)	47
D4 Toelichting bij de testplaat van 'het horen van twee melodieuze'	49
D5 Draaiboek cassettebanden	51
D6 Logaritme en logaritmisch grafiekenpapier	57
I1 Het oor beluisterd	59
I2 Popmuziek en gehoorschade	64
I3 Het meten van de nagalmtijd	70
Apparatuurgids	71

Deze Lerarenhandleiding is in de eerste plaats geschreven voor de leraren die met dit thema willen werken in HAVO-bovenbouw. Daarom bevat deze handleiding bij het thema Muziek, naast een verantwoording van het thema, suggesties voor het werken ermee in de klas. De bijlagen bevatten verder achtergrondinformatie over die onderwerpen die nieuw of ongebruikelijk zijn voor een HAVO-bovenbouw-kursus.

Daarnaast kan deze handleiding dienen als toelichting op het thema voor andere leraren, lerarenopleiders, leerplanontwikkelaars en overige belangstellenden.

In de tweede druk van deze handleiding zijn ervaringen verwerkt van het gebruik van dit thema in de klas tijdens de schooljaren 1983/84 en 1984/85.

Het PLON-team
Lab. Vaste Stof
Rijksuniversiteit Utrecht
Postbus 80.008
3508 TA Utrecht

September 1985.

PLAATS EN KARAKTER VAN HET THEMA

1. DE PLAATS VAN HET THEMA IN DE CURSUS

De PLON-cursus voor 4- en 5-HAVO bestaat uit een tiental thema's. 'Muziek' is geschreven als derde thema in 4-HAVO, maar wordt soms als vierde thema behandeld (d.w.z. na 'Verkeer').

PLON-thema's 4-HAVO:

- Vergelijken
- Weersveranderingen
- Muziek
- Verkeer
- Elektrische Machines
- Energie en Kwaliteit

PLON-thema's 5-HAVO:

- Materie
- Lichtbronnen
- Elektronika
- Ioniserende Straling
- Examen Doen

2. ACHTERGROND EN VERANTWOORDING VAN DE THEMA-KEUZE

In het leven van veel leerlingen (en van veel volwassenen) speelt muziek een belangrijke rol. Een deel van hen beoefent muziek in actieve zin: ze bespelen een bepaald instrument. Een groter aantal mensen luistert naar muziek en beleeft hieraan veel genoeg. Het ligt daarom voor de hand te zoeken naar mogelijkheden om in het onderwijs aan te sluiten bij dit onderdeel van de leefwereld van leerlingen.

Het kan daarbij niet de bedoeling zijn in de natuurkundelessen alle aspecten van muziek aan bod te laten komen. Het schoolvak Muziek biedt daarvoor veel betere mogelijkheden.

We hebben daarom een keuze gemaakt uit die aspecten waar de fysica een bijdrage kan leveren aan een beter inzicht in muziek. Vier gebieden leken ons hiervoor het meest geschikt:

- de klankkleur van instrumenten;
- de subjectieve en objectieve kanten aan het luisteren naar muziek;
- de akoestiek;
- de kwaliteit van audio-apparatuur.

Deze vier onderwerpen maken het mogelijk een zinvolle invulling te geven aan een aantal algemene doelen van het onderwijs in de bovenbouw van de havo:

1. Persoonlijke vorming. We denken daarbij aan:

- kennis van de karakteristieken van het eigen gehoor;
- inzicht in factoren die de kwaliteit van muziek bepalen;
- inzicht in verschillen tussen muziekinstrumenten, gehoororganen, ruimten en audio-apparatuur;
- steun bij de aanschaf van apparatuur;
- overzicht van mogelijkheden om ruimten in akoestisch opzicht aan te passen.

2. Kennismaking met wetenschap en toepassingen van de wetenschap.

Als voorbeelden noemen we:

- methoden om muzikaal geluid te analyseren;
- het werk van akoestiek-deskundigen;
- elektronika;
- psychofysika, een tak van wetenschap die de laatste 25 jaar grote vorderingen heeft gemaakt; de link met biologie kan hier op natuurlijke wijze benadrukt worden.

3. Voorbereiding op verdere studie.

De leerlingen raken vertrouwd met belangrijke begrippen uit de leer van trillingen en golven, met formules die het verband tussen deze begrippen uitdrukken en met het werken met apparatuur zoals oscilloscoop, toon-generator, bandfilter en dB-meter.

3. ERVARING MET HET THEMA "GELUIDSPATRONEN"

Geluidspatronen was één van de oudste delen uit de reeks 1e versietheema's. Voorzichtige aanzetten tot vernieuwing van dit thema waren:

- geen formele behandeling van harmonische trillingen, terugkaatsing aan vast en vrij uiteinde;
- meer over technische hulpmiddelen en het kwaliteitsaspect bij geluidswaardering; ook iets over geluidsterkte;
- keuzeonderwerpen met suggesties zoals akoestiek, geluidshinder, stereofonie, geluid bij film en ultrageluid.

Bij docenten en ontwikkelaars leefden enkele bezwaren tegen dit thema zoals de schematische aanpak zonder duidelijke themavragen, de zwakke koppeling tussen proeven en theorie en de geringe aansluiting bij praktijksituaties. Vandaar dat gekozen is voor een grondige revisie van het 1e versietheema tot een nieuw thema waarbij de goede aspecten van "Geluidspatronen" zouden worden aangevuld met oplossingen voor de aangevoerde bezwaren. Een belangrijke overweging om daarbij voor muziek te kiezen is het idee om de interessegebieden van de diverse thema's uiteenlopend te laten zijn. Vandaar een thema dat aansluit bij de wereld van kunst en cultuur en dat aandacht schenkt aan de emotionele beleving van leerlingen. Tevens is gelet op een duidelijk onderscheid met het onderbouwthema "Geluid Weergeven".

4. GLOBALE OPZET

In het thema staan twee vraagstellingen centraal:

- Wat bepaalt (objectief beschreven) het karakter en de kwaliteit van muziek en hoe kun je deze veranderen?
- Hoe beïnvloedt het gehoor van een individu dat karakter en die kwaliteit van muziek (subjectief beschreven)?

Onder kwaliteit verstaan we daarbij niet de waardering van muziek (mooi of lelijk) maar we bedoelen dat kwaliteit iets zegt over de mate van beïnvloeding die de muziek ondergaat op zijn weg van bron via medium naar ontvanger.

Hoofdstuksgewijs ziet het themaboek er globaal gezien als volgt uit (zie ook de samenvatting in bijlage D1):

Hoofdstuk 1 bevat een oriëntatie op de inhoud van het thema: themavraagstellingen en de opzet van het thema komen aan de orde. Verder worden de leerlingen georiënteerd op een aantal basisbegrippen die wellicht al min of meer bij hen bekend zijn en op enkele veel gebruikte meetinstrumenten (toongenerator, oscilloscoop en dB-meter). De bijlagen 1 t/m 3 bevatten handleidingen voor het gebruik van deze apparatuur.

Hoofdstuk 2 gaat over snaar- en blaasinstrumenten. Aan de orde komt op welke manier deze instrumenten tonen produceren en waarom deze tonen verschillen. Leerlingen doen proeven en maken opdrachten. Aan het eind van het hoofdstuk doen de leerlingen een klein onderzoekje (praktisch of theoretisch) aan de hand van werk vragen aan een eigenschap van muziekinstrumenten. Hierover rapporteren ze aan hun klasgenoten.

PLAATS EN KARAKTER VAN HET THEMA

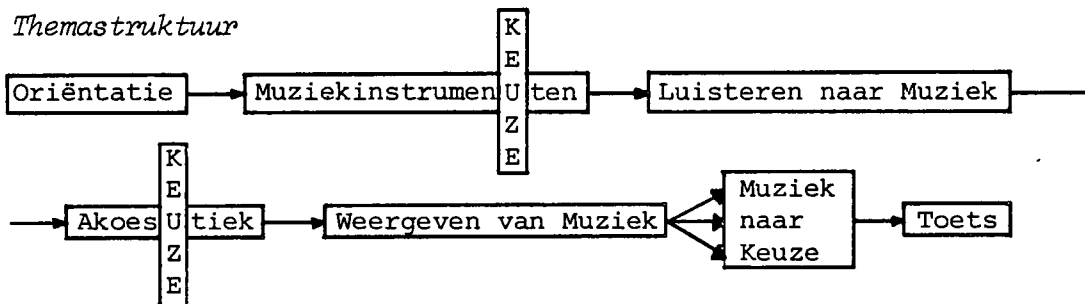
In hoofdstuk 3 gaat het over de werking van het oor, met name wat betreft het waarnemen van geluidsniveau en toonhoogte. Centraal in dit hoofdstuk staat het maken van een Persoonlijke Gehoor Beschrijving (P.G.B.). Dit kan klassikaal gebeuren met behulp van een speciaal vervaardigde geluidsband. Verder leren leerlingen rekenen aan geluidsniveaus en verdiepen ze zich in de werking van het oor en in geluidsstoornissen.

Hoofdstuk 4 is gewijd aan akoestiek en daarbij met name aan de vraag welke factoren in welke mate van invloed zijn op de vervorming van geluidsignalen op hun weg van bron naar ontvanger. Ook leren de leerlingen mogelijkheden kennen om de kwaliteit van de overdracht zo groot mogelijk te maken. Een band-diaserie leidt het onderwerp in. De leerlingen rekenen verder aan geluidsniveaus. Ook maken ze een keuze uit 5 omvangrijke proeven waarover ze een rapportage verzorgen.

Hoofdstuk 5 besteedt aandacht aan het "inblikken" en weergeven van muziek. Aan welke eisen moeten de verschillende onderdelen van een geluidsinstallatie voldoen om een goede weergave te bereiken? Hoe moeten de verschillende onderdelen aan elkaar aangepast zijn? De leerlingen werken aan deze vragen in groepjes met behulp van één onderdeel van geluidsinstallaties. Daarna volgt een klassikale uitwisseling.

Tenslotte is er nog hoofdstuk 6: een keuzeperiode. De leerlingen kiezen zelf een onderwerp dat met muziek en natuurkunde heeft te maken. Het soort onderzoekje is vrij. De bedoeling is dat elk onderzoekje met een verslag wordt afgesloten. Hiertoe bevat het hoofdstuk een aantal tips.

Themastructuur



Het lesmateriaal bestaat allereerst uit het themaboek "Muziek".

Verder zijn een aantal cassettebandjes vervaardigd met het oog (of oor) op dit thema:

- bij par. 2.4 (aktiviteit 1): een bandje waarop dezelfde melodie steeds door andere instrumenten wordt gespeeld (de Bolero van Ravel);
- bij par. 2.4 (aktiviteit 2): een bandje met signalen van verschillende muziekinstrumenten om te analyseren met behulp van een bandfilter;
- bij par. 3.3 (aktiviteiten 1 t/m 10): een bandje aan de hand waarvan de Persoonlijke Gehoor Beschrijving (P.G.B.) kan worden gemaakt;
- bij par. 4.1 (aktiviteiten 1 en 2): twee band-diaseries waarop een gitarist te zien en te horen is, die hetzelfde muziekstuk in verschillende ruimten speelt;
- bij par. 4.4 (aktiviteit 1): een bandje als bij par. 4.1.

Deze handleiding bevat verder een exemplaar van de PGB ter kopiëring voor alle leerlingen (bijlage D3).

Veel apparatuur voor de proeven zal op de meeste scholen al wel beschikbaar zijn. Het aantal apparaten van een soort moet eventueel worden vergroot. Nieuw zullen zijn: een bandfilter (H 2), een geluiddichte kist als modelkamer (H 4) en een complete geluidsinstallatie (H 5).

Verder is het aan te bevelen te zorgen voor een variatie aan muziekinstrumenten tijdens de lessen (via leerlingen of muzikleraar).

LEERSTOF, VAARDIGHEDEN EN BEGINSITUATIE

1. Leerstof

In het Experimenteel PLON Examen Programma (E.P.E.P.) is de leerstof beschreven die in dit thema aan de orde komt. In bijlage D1 van deze handleiding is het gebied 'Geluid en Muziek' opgenomen.

Nieuw in vergelijking met de reguliere lijst zijn vooral onderwerpen als de gevoeligheid van het oor (gehoordrempel, verschiltönen, dissonanten, maskering), akoestische eigenschappen van ruimten (nagalmtijd, frequentie-karakteristiek, versterking en vervorming, signaal-ruisverhouding) en de trits bron-medium-ontvanger als systeem van geluidsoverdracht. Daarnaast komen belangrijke fysische begrippen als absorptie, reflectie en transmissie aan bod in de context geluid en wordt aandacht besteed aan de relatie tussen geluidsterkte en de afstand tot de geluidsbron (kwadratenwet). Het zal de lezer waarschijnlijk opgevallen zijn dat het EPEP slechts een schrale afbeelding is van alles wat in het thema "Muziek" aan inhoud wordt geboden. Dat heeft te maken met het tijdstip van schrijven van het thema: het EPEP moest af zijn voordat met het samenstellen van het thema "Muziek" kon worden begonnen. We hopen dat de begrippen, die niet in het EPEP staan toch voldoende aandacht krijgen om te zijner tijd voorstellen voor een definitief examenprogramma op basis van ervaringen te kunnen doen.

Compensatie voor het toevoegen van nieuwe leerstof hebben we vooral gezocht in een minder formele behandeling van begrippen als harmonische trilling, fase, terugkaatsing aan vast en vrij uiteinde en snelheid en versnelling van trillende voorwerpen, en door golven en trillingen te beperken tot de context geluid.

Voor de duidelijkheid willen we ook nog even op een rij zetten welke aandacht *rekenen met grootheden* krijgt in het thema "Muziek":

- de formule $v = f \cdot \lambda$ komt in de hoofdstukken 2 en 4 aan bod;
- rekenen aan geluidsniveaus met behulp van $L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$ in hoofdstuk 3;
- frequenties waarbij in een ruimte staande golven optreden worden bepaald ($f_n = n \cdot \frac{v}{2L}$), maar ook in een driedimensionale ruimte

$$f = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{n}{L}\right)^2 + \left(\frac{m}{B}\right)^2 + \left(\frac{k}{H}\right)^2};$$
- de nagalmtijd van een ruimte wordt berekend: $T_{60} = \frac{1}{6} \frac{V}{S}$ (H 4);
- bij geluidsinstallaties worden stromen en vermogens berekend (H 5);
- boventonen van snaren en luchtkolommen worden berekend (H 2);
- er wordt gerekend aan de afmetingen van het groevenpatroon van een grammofoonplaat.

In het volgende thema van de cursus, "Verkeer", wordt nog veel meer geoefend met formules.

Evenals bij "Weersveranderingen" wijzen we er met nadruk op dat de aangeleerde begrippen en wetmatigheden moeten functioneren *binnen* de gekozen context van muziek en geluid en dat er op *deze plaats* in de cursus en bij *deze moeilijkheidsgraad* van bedoelde begrippen en wetmatigheden niet moet worden gestreefd naar generalisatie naar andere contexten.

2. Vaardigheden

Met betrekking tot het doen van experimenten ligt de nadruk er op dat de leerlingen:

- een gesloten proefinstructie kunnen volgen;
- diverse fysische meetinstrumenten kunnen aflezen en gebruiken;

LEERSTOF, VAARDIGHEDEN EN BEGINSITUATIE

- het verband tussen grootheden met behulp van een experiment kunnen nagaan;
- resultaten van metingen in een diagram kunnen weergeven;
- een experiment kunnen opzetten over een gegeven werkvraag;
- uit grafieken met *lineaire en logaritmische assen* gegevens kunnen aflezen;
- de afloop van een experiment kunnen voorspellen.

Verder ligt in de keuzeperiode de nadruk op het maken van een schriftelijk verslag over een experiment, een interview, een excursie of een literatuurstudie.

3. Beginsituatie

We zijn er van uit gegaan dat de basisbegrippen die in het eerste hoofdstuk aan bod komen niet geheel nieuw zijn voor de leerlingen. Het kan zijn dat in de onderbouw havo of op de mavo sommige begrippen niet zijn behandeld. Vandaar in het eerste hoofdstuk een oriëntatie op de begrippen toonhoogte, frequentie, geluidsniveau, trillingstijd, amplitude, geluidsniveau, resonantie en eigenfrequentie.

Verder nemen we aan dat de leerlingen vertrouwd zijn met:

- het begrip massa (par. 2.2)
- logaritmen (par. 3.2)
- rekenen met machten van 10 (par. 3.2)
- een sinusfunctie (par. 3.3)
- het begrip vermogen met eenheid (H 4)
- begrippen spanning, weerstand en stroomsterkte met eenheden (H 5).

LESSENPLAN

Bij het samenstellen van het thema heeft ons de volgende lessenverdeling voor ogen gestaan:

		Lessuren
Hoofdstuk 1	Oriëntatie	2
Hoofdstuk 2	Muziekinstrumenten	6
Hoofdstuk 3	Luisteren naar Muziek	3
Hoofdstuk 4	Akoestiek	5
Hoofdstuk 5	Weergeven van Muziek	3
Hoofdstuk 6	Muziek naar keuze	4
Toets		1
	Totaal	24

De ervaringen van de proefschoolleraars wijzen uit dat dit lessenschema aan de krappe kant is. De leraren noemden de volgende oorzaken voor het uitlopen van het aantal lessen:

- er komen erg veel begrippen aan bod in dit thema;
- de practicumproeven kostten meer tijd dan gepland was;
- hetzelfde geldt voor het bespreken van opgaven;
- het rekenen met logaritmen nam extra tijd in beslag.

Afgaande op de gemiddelden van de lessenaantallen per hoofdstuk lijkt het realistischer te stellen dat eigenlijk 28 lessen nodig zijn om het thema helemaal te doen. De vier extra lessen zijn nodig voor de hoofdstukken 2 t/m 5. Het lessenplan luidt dan: 2 - 7 - 4 - 6 - 4 - 4 - 1.

Mocht dit aantal van 28 lessen te veel zijn gezien het beschikbare aantal uren in 4-HAVO, dan zijn de volgende aanpassingen mogelijk:

- het behandelen van 'Muziek' ná 'Verkeer': de leerlingen zijn dan wat meer vertrouwd geraakt met het werken met formules;
- het combineren van de keuzeperioden van 'Muziek' en 'Weersveranderingen';
- meer demonstratieproeven;
- het schrappen van een aantal opgaven;
- het doorschuiven van onderdelen van de hoofdstukken 2 t/m 5 naar de keuzeperiode (H 6).

Voorbeeld van een 'succesvol' lessenplan

les	hoofdstuk	
0		HW: lees par. 1.1 t/m 1.3 (t/m blz. 9)
1	1	basisbegrippen (horen, zien, bespreken) uitleg werking toongenerator en oscilloscoop HW: par. 1.3 (onderdeel 1 t/m 5) + bijlage 1
2	1	vervolg basisbegrippen; dB-meter HW: par. 2.1 en 2.2, opgaven 3 t/m 8 uit par. 2.2, lees bijlage 2
3	2	bespreken en demonstreren par. 2.1 en 2.2 (opdracht 1 en 2); bespreken opgaven 3 t/m 8 HW: lees par. 2.2 (opgave 9 en 10), 2.3 en bijlage 3. Voer opdracht 2.3.1 thuis uit.
4, 5	2	demonstratie par. 2.2 (opgave 9 en 10) en opgave 2.3.2 HW: lees par. 2.3, maak opgave 4 en 5
6	2	demonstratie opgave 3, nakijken 4 en 5 HW: lees par. 2.4, maak opgave 2 en 3, lees alvast 2.5

LESSENPLAN

les	hoofdstuk	
7	2	luisteren naar opdracht 1 (en 2) uit 2.4; nakijken opgave 2 en 3; uitkiezen onderzoekje uit par. 2.5 HW: onderzoekje voorbereiden
8	2	tijd voor onderzoekje HW: uitschrijven resultaten op 1 pag.
9	2	korte rapportages over oz HW: lees par. 3.1 en 3.2 (tot opgave 2) en lees/maak stencil over logaritmen
10	3	uitleg oor en logaritmen HW: lees par. 3.2; maak 3.2: 2, 3 en 4
11	3	bespreken theorie en opgaven HW: lees par. 3.3 en maak opgave 5 (inleveren)
12	3	inleveren opgave 3.3.5 en demonstratie 3.3: 1, 3, 4, 6 en 7 HW: lees en maak par. 3.4
13	3	bespreken theorie en opdrachten HW: lees par. 4.1 en 4.2, maak 4.2.1
14	4	beluister bandjes 4.1.1 en bespreken theorie en opgave uit 4.2 HW: lees par. 4.2, maak opgave 2, 4, 5
15	4	bespreken gemaakte opdrachten en theorie voor zover nodig HW: lees par. 4.3 (zonder kader) en maak opgave 3 (met 001, 010, 100, 011, 101, 110, 111)
16	4	aandacht voor theorie en opgave 3 HW: lees par. 4.4 en maak 4.4.2
17	4	beluisteren van bandje bij 4.4.1 en bespreken opgave 2 HW: maak 4.4: 3, 4, 5, 6, 8
18	4	controleren van opgaven HW: lees par. 5.1 en 5.2; maak 5.1.1, 5.1.2, 5.2.2 en 5.2.4
19	5	nalopen theorie en opgaven HW: lees par. 5.2, maak 5.2 opgave 5a, 6, 7, 8
20	5	bespreken van theorie, nakijken opgaven HW: lees par. 5.3 en 5.4; maak 5.3: 1 en 2 en 5.4: 1 t/m 3
21	5	bespreken theorie en opgaven HW: lees par. 5.4 en 5.5; maak 5.4.4 en 5.5: 1 t/m 3
22	5	bespreken laatste theorie en opgaven
23		Proefwerk 'Muziek'
24 t/m 27		Keuzeonderzoek uit 'Weersveranderingen' of 'Muziek'. Werkplan uiterlijk les 20 inleveren.

ERVARINGEN

Er is in de schooljaren 1983/84 en 1984/85 geen vragenlijst over het thema 'Muziek' aan de leerlingen voorgelegd. Wel hebben een aantal leraren in beide leerjaren hun ervaringen vastgelegd.

In het algemeen vonden de leraren het een leuk maar vrij moeilijk thema. Ze constateerden dat het thema veel begrippen aanstipt en een grote informatiedichtheid heeft. Sommigen vonden die veelheid ten koste gaan van de diepgang, anderen vonden zo'n brede aanpak geen bezwaar. Enkele leraren merkten op dat het voor leerlingen door de veelheid een wat rommelig thema is wat hen soms in problemen brengt bij het bestuderen van de stof voor het proefwerk. Enige sturing van docentzijde met betrekking tot wat belangrijk en minder belangrijk is lijkt dus aan te bevelen.

Voor veel leraren bevat het thema nieuwe stof dus dat was ook even wennen. Door een tekort aan apparatuur waren ze verder gedwongen meer demonstratieproeven uit te voeren dan ze wenselijk vonden. Ook bleek een zeer goede organisatie van de lessen nodig en voldoende begeleiding van de leerlingen. Op de vraag naar de belangstelling van leerlingen antwoordden de meeste leraren dat de voorkeuren van leerlingen verdeeld zijn over oor, akoestiek en audioapparatuur. Voor muziekinstrumenten is wat minder belangstelling. Prettig aan dit thema vond men de mogelijkheid om in werkvormen af te wisselen en ook de keuzeonderzoeken zijn goed bevallen bij de meesten.

Als belangrijkste leerervaringen van leerlingen noemden de docenten:

- a. fysica: staande golven, resonantie, toonhoogte, absorptie, nagalmtijd;
- b. relatie fysica - leefwereld: werking muziekinstrument, kennis geluidsapparatuur, het ingewikkelde oor, veel factoren beïnvloeden wat je hoort, klank bestaat uit meer tonen, aan geluid en muziek kun je meten en rekenen;
- c. omgaan met apparatuur: scoop, dB-meter, toongenerator;
- d. methoden van werken: samenwerken, eigen onderzoek opzetten en uitvoeren, verslag maken;
- e. diverseren: dat λ een afstand is en te meten, dat toonhoogte te begrijpen is, dat versterking van signalen nodig is.

ORIENTATIE

<i>uitwerking lessenplan</i>		
lesnr.	onderdeel	tijdsduur in minuten
1.	oriëntatie op themavragen / thema-opzet	20
	oriëntatie op basisbegrippen / meetapparatuur	25
2.	oriëntatie op basisbegrippen / meetapparatuur (vervolg)	30
	samenvatting basisbegrippen	15

bedoeling

- Oriënteren op de centrale themavragen, en het "definiëren" van het begrip "kwaliteit".
- Oriënteren op de manier van werken aan het thema.
- Oriënteren op basisbegrippen (toonhoogte - frequentie - trillingstijd, geluidsniveau - amplitude, geluidsniveau, resonantie -eigenfrequentie) en de relaties tussen die begrippen.
- Oriënteren op het gebruik van thema-specifieke (meet)apparatuur (oscilloscoop, toongenerator, dB-meter).

leerlingactiviteiten

- Luisteren naar leerkracht (en muziek) en praten over de centrale themavragen.
- Een aantal oriënterende proeven doen, gericht op het verwerven van een zekere hoeveelheid basiskennis en een zekere vaardigheid in het omgaan met voor het thema karakteristieke (meet)apparatuur.
- Een samenvatting schrijven.

didaktische aanwijzingen

1.1 DE KWALITEIT VAN MUZIEK

Deze paragraaf geeft een beschrijving van de centrale themavragen. Een belangrijk punt daarin is de opvatting over de betekenis van het woord "kwaliteit". Het gaat in dit thema niet om uitspraken over de kwaliteit van muziek als het gaat om verschillende muziekstijlen. Om duidelijk te maken dat het daar niet om gaat, kun je een (beperkt) aantal leerlingen vragen voor de eerste les rond het thema "Muziek" hun favoriete single (of lp-gedeelte) mee te nemen. Na het afspelen in de klas kun je de leerlingen hun waardering resp. afkeer laten uitspreken en zo mogelijk laten ingaan op de verschillen in waardering en de mogelijke oorzaken daarvan. Een dergelijk gesprek leidt hoogstwaarschijnlijk tot de nogal platvloerse conclusie "dat over smaak niet te twisten valt". Zo'n conclusie kan aangegrepen worden om aan te geven waar het in het thema "Muziek" dan wél over gaat: de kwaliteit van de overdracht van muziek vanuit de bron, via een "medium" tot in de ontvanger. Waardoor wordt die kwaliteit (objectief en subjectief) bepaald, hoe kan de kwaliteit van die overdracht beïnvloed/verbeterd worden?

1.2 DE OPZET VAN HET THEMA "MUZIEK"

Het "structuurplaatje" van het thema "Muziek" kan voorzien worden van een tijdplanning en een aanduiding van de belangrijkste leerlingactiviteiten/

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

werkvormen. Ophangen op het prikbord in de klas gedurende het werken aan het thema.

1.3 BASISBEGRIPPEN EN MEETAPPARATUUR

De proeven in deze paragraaf geven een samenvatting van het onderwerp "geluid" uit het PLON-thema "Geluid Weergeven" uit de 3e klas. Leerlingen die in de 3e klas met dit thema gewerkt hebben en MAVO-instromers met een "PLON-opleiding" zullen in deze paragraaf niets nieuws vinden. "Geluid" vormt echter (nog) geen onderdeel van het reguliere MAVO-examenprogramma. MAVO-instromers met een opleiding volgens het reguliere programma kunnen bij dit onderdeel van het thema dus in (extra) moeilijkheden raken bij een te hoog tempo.

Er zijn een aantal manieren om met de proeven in paragraaf 1.3 om te springen. Hieronder werken we twee mogelijkheden enigszins uit: cirkelpraktikum en demonstraties.

- cirkelpraktikum

De proeven 1 t/m 9 (eventueel met uitzondering van 2 en 7) staan op aparte tafels opgesteld, voorzien van de proefinstructie uit het themaboek (en eventueel de bedieningshandleiding van oscilloscoop, toongenerator en dB-meter: de bijlagen 1 t/m 3 uit het themaboek). De leerlingen rouleren in kleine groepen langs de verschillende opstellingen. Bij de nabespreking/samenvatting van de basisbegrippen en de relaties daartussen kan zonodig proef 2 als demonstratieproef (ook mogelijk op de overhead-projector) gedaan worden. De proef is nogal "veelzijdig": er blijkt uit dat een geluidbron trilt, het principe van de oscilloscoop zit erin verwerkt en de proef "toont" de relaties amplitude - geluid"sterkte" en frequentie - toonhoogte.

- demonstraties

De proeven 1 t/m 9 (met uitzondering van 7) worden als demonstratieproeven uitgevoerd door de leerkracht (of door één of meer leerlingen), afgewisseld door een introductie van basisbegrippen en -relaties.

De tweede manier heeft als nadeel dat de leerlingen op dit moment geen ervaring opdoen in het omgaan met in het thema veel gebruikte (meet)apparatuur. Dat kan verderop in het thema tot "vertragingen" aanleiding geven, als bij een in verhouding tot de proeven in paragraaf 1.3 lastiger proef of onderzoek zich ook nog eens bedieningsproblemen met de apparatuur voordoen. Dit kan voorkomen worden door na de demonstraties en uitleg rond paragraaf 1.3 de leerlingen de mogelijkheid te geven de (meet)apparatuur aan de hand van de bedieningshandleidingen (bijlagen 1 t/m 3 in het themaboek) te laten verkennen. Dit kan roulerend in kleine groepen gebeuren, waarbij een "voldoend aantal" oscilloscopen een voorwaarde is voor het voorkómen van organisatieproblemen (de oscilloscoop vraagt de meeste "verkenningstijd").

Een belangrijk punt bij de samenvatting is de aard van het geluidspatroon op een oscilloscoopscherm: uitwijking als functie van de *tijd*. Omdat in hoofdstuk 2 plaatjes/tekeningen voorkomen die eenzelfde sinus-achtig verloop hebben, maar daar de vorm van een golf (uitwijking als functie van de *plaats* op opeenvolgende *tijdstippen*) voorstellen, kan er bij de leerlingen verwarring ontstaan. Het in hoofdstuk 1 benadrukken van de functie van de oscilloscoop en het daarop teruggrijpen in hoofdstuk 2 kan mogelijk een deel van deze verwarring voorkomen.

MUZIEKINSTRUMENTEN

bedoeling

- De aandacht vestigen op de grote verscheidenheid aan muziekinstrumenten en op de factoren waarop deze instrumenten van elkaar verschillen.
- Inzicht verwerven in de factoren die van belang zijn bij het vervaardigen en bespelen van muziekinstrumenten.
- Kort onderzoekje doen in groepjes aan muziekinstrumenten.

leerlingactiviteiten

- Oriëntatie op muziekinstrumenten door spreekwoorden te bedenken of op bezoek gaan bij een bouwer van muziekinstrumenten of bij een muziekwinkel.
- Proefjes uitvoeren.
- Verwerkingsopdrachten maken.
- Trillingspatronen tekenen.
- Frequentieanalyse maken en interpreteren.
- Een onderzoekje doen aan een muziekinstrument.
- Bestuderen van stukjes tekst waarin de volgende begrippen behandeld worden: buik, knoop, golflengte, eigenfrequentie, grondtoon, boventoon, golfsnelheid, staande/lopende golf, spankracht, massa per lengte eenheid, klankkleur, en waarin de formule $v = f \cdot \lambda$ wordt besproken.

didaktische aanwijzingen

- 2.1 ● Ter oriëntatie op het onderwerp. Opdracht 1 als huiswerk opgeven. Eventueel kort verslagje laten maken als er geen tijd is om de ervaringen in de klas te bespreken.
- 2.2 (2 lessen) ● De paragraaf bevat proefjes (1, 2, 9, 10), informatieve tekst en verwerkingsopdrachten (3 t/m 8). Het praktikum kan als volgt worden georganiseerd:
- a. alle groepjes doen dezelfde proefjes tegelijkertijd: vereist voldoende aantallen apparatuur,
 - b. leerlingen werken tegelijkertijd aan proefjes uit par. 2.2 en par. 2.3 (bijvoorbeeld in de vorm van een circuspraktikum),
 - c. enkele proeven worden gedemonstreerd.
- De teksten kunnen zowel in de les als thuis worden bestudeerd. Hetzelfde geldt voor het maken van verwerkingsopdrachten. Problemen kunnen dan klassikaal of per groepje worden besproken.
- 2.3 (1 les) ● Voor deze paragraaf geldt hetzelfde als de vorige. De begrippen uit par. 2.2 worden hier toegepast op een nieuwe situatie: blaasinstrumenten. De paragraaf bevat 3 proeven en 2 verwerkingsopdrachten.
- 2.4 (1 les) ● Deze les kan eventueel klassikaal worden gedaan. Bij het PLON is een bandje verkrijgbaar waarop dezelfde melodie (Bolero van Ravel) steeds door andere instrumenten wordt gespeeld. Na het spelen van dit bandje en het doen van activiteit 1, kan dan een toelichting worden gegeven op het begrip klankkleur en kan gedemonstreerd worden hoe met een bandfilter een bandje met verschillende muziekinstrumenten kan worden geanalyseerd.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

Sommige leerlingen kunnen dan in de volgende paragraaf keuzeonderzoek 3 kiezen. Als huiswerk kan activiteit 3 worden gedaan.

- 2.5 (2 lessen) ● Deze paragraaf bevat een aantal korte keuzeonderzoekjes die deels in de les, deels na schooltijd kunnen worden uitgevoerd. Het gaat er daarbij om dat leerlingen kiezen naar interesse en dat ze bij de rapportage vooral laten zien welke werkvraag ze hebben gekozen, hoe ze hebben gewerkt en welke begrippen uit de par. 2.2 t/m 2.4 een rol hebben gespeeld in hun onderzoekje.
- Het bezwaar kan rijzen dat de tijd die beschikbaar is voor de onderzoekjes te kort is. Hiervoor suggereren we 2 oplossingen:
- leerlingen werken in de eerste les van deze paragraaf aan de opzet van hun onderzoekje en voeren buiten lestijd hun onderzoek uit (in tussenuren, na schooltijd op school of thuis) in de daaropvolgende week, terwijl in de lessen dan H 3 aan de orde is. Rapportage vindt dan ná H 3 plaats.
 - in het begin van H 2 maken de leerlingen al een keus uit de onderzoekjes en bereiden zich parallel aan de behandeling van de par. 2.2 t/m 2.4 voor op hun eigen onderzoekje.

Toelichting bij enkele activiteiten

- 2.1 1. ● Spreekwoorden en gezegden over muziekinstrumenten:
- de eerste viool spelen
 - zoiets heb ik nog nooit op de viool horen spelen
 - mankeert het hem niet aan de viool dan mankeert het hem aan de strijkstok
 - er blijft veel aan de strijkstok hangen
 - het kan me geen fluit schelen
 - een fluitje van een cent
 - hoog van de toren blazen
 - de aftocht blazen
 - iemands lof trompetten
 - de trom roeren
 - met stille trom vertrekken
 - met slaande trom vertrekken
 - klinken als een klok
 - extra oorlam aan de klok
 - iets aan de grote klok hangen
 - hij heeft de klok horen luiden maar weet niet waar de klepel hangt
 - een stem als een klok
 - alle registers openzetten
 - een gevoelige snaar raken
 - alles op haren en snaren zetten
 - er is een snaar aan hem los
 - piano an doen
 - de lier tokkelen
 - de lier aan de wilgen hangen
 - een hoge toon aanslaan
 - uit de toon gaan
- Enkele voorbeelden van muziekinstrumenten:
- *slag*: triangel, bekken, trom, pauk, slaghout, xylofoon,

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

- *snaar*: viool, altviool, violoncel, cello, contrabas, piano, gitaar, clavecimbel, ukelele, mandoline,
- *blaas*: trompet, trombone, hoorn, tuba, klarinet, hobo, orgel, fluit, piccolo, panfluit, fagot, saxofoon,
- *elektronisch*: synthesizer, elektronisch orgel.

- Voor instrumentbouwers en muzikwinkels: zie de Gele Gids. Vraag eventueel suggesties aan de muzikleraar.

2.2 2. Bekende proef van Melde. Bedoeld om ervaringen op te doen met het ontstaan van staande golven.

5. $\lambda = \frac{2}{3} l$; $f_0 = 200 \text{ Hz}$

7. $f_0 = 250 \text{ Hz}$; $f_1 = 500 \text{ Hz}$; $f_3 = 1000 \text{ Hz}$; $f_4 = 1250 \text{ Hz}$

$f_0 : f_1 : \dots : f_4 = 1 : 2 : \dots : 5$

8. kwalitatief: spanning aandraaien als op foto p. 16.

kwantitatief: bekende gewichten aan snaar hangen die over katrol loopt.

9. Betreft uitbreiding van aktiviteit 2 met doel vertrouwd te raken met de stroboscoop.

10. $v = f \cdot \lambda$, bij grondtoon $\lambda = 2 l$ dus $f_0 = v/2 l$ en $f_0 \propto 1/l$

v te berekenen uit $v = f_0 \cdot 2 l$

Het is hier niet de bedoeling uitvoerig aandacht te besteden aan grafieken die omgekeerd evenredige verbanden tussen grootheden laten zien.

2.3 2. Bekende proef van Kundt, bedoeld om iets zichtbaar te maken van de resonerende lucht in de buis.

3. Ook hier komt uit $f_0 \propto 1/l$. Eventueel kan het resultaat van deze proef worden gebruikt om aan het eind van par. 2.3 te bepalen wat voor soort buis het hier betrof: open of gesloten.

4. ● $f_n = \frac{v}{2 \frac{l}{n+1}} = (n+1) \cdot \frac{v}{2 l}$ (deze formule niet aan lln geven)

● $f_0 : f_1 : f_2 : \dots = 1 : 2 : 3 : \dots$

● $l = 38,6 \text{ cm}$, $f_1 = 880 \text{ Hz}$, $f_2 = 1320 \text{ Hz}$

● $f_n = (2n+1) \frac{v}{4 l}$ (deze formule niet aan lln geven)

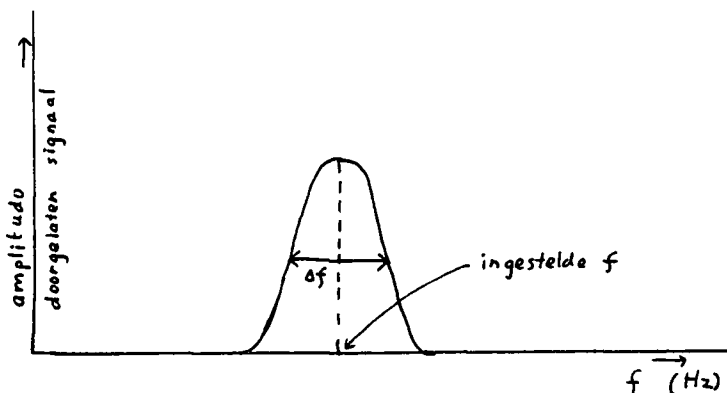
● $f_0 : f_1 : f_2 : \dots = 1 : 3 : 5 : \dots$

● $l = 19,3 \text{ cm}$, $f_1 = 1320 \text{ Hz}$, $f_2 = 2200 \text{ Hz}$

2.4. 1.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

2. Het bandfilter bevat een elektrische schakeling die alleen sinussignalen doorlaat, waarvan de frequentie ten hoogste $\frac{1}{2} \Delta f$ afwijkt van de ingestelde frequentie f .



*frequentie karakteristiek van een bandfilter
met bandbreedte Δf*

Niet sinus-vormige signalen, zoals een samengestelde muzikale toon, kunnen met behulp van een bandfilter worden ontleed. De verschillende componenten kunnen met behulp van een oscilloscoop op frequentie en amplitude worden onderzocht.

Het bandfilter kan voor zeer weinig geld (ca. f 15,--) gebouwd worden en kan uit twee batterijtjes van 9 V worden gevoed.

Voor een bouwschema verwijzen we naar de apparatuurgids.

Aan de ingang van het bandfilter wordt het te onderzoeken signaal aangesloten. Dat kan een bandje van het PLON zijn (zie bijlage D 5) of eigen opnamen op bijvoorbeeld een zogenaamde "endless cassette".

Voor ca. f 20,-- is zo'n doorlopend bandje van 1 minuut in de muziekwinkels verkrijgbaar (Vb. TDK EC-1 Endless Cassette).

Aan de uitgang wordt de oscilloscoop aangesloten. Door langzaam aan de frequentieknop te draaien wordt het frequentiegebied gescand; als stations op een radio komen de verschillende componenten één voor één door.

In de diagrammen wordt de component met de hoogste gemeten amplitude op 100 gesteld. De amplitudes van de andere componenten kunnen dan in percentages worden uitgedrukt van de sterkste component.

- 2.5 1. Het is niet de bedoeling alle instrumenten uit de figuur ernaast te analyseren. Schakel zo mogelijk de muzikleraar in om aan instrumenten te komen.
2. De muzieknotatie van geluidssterkte is toegevoegd ter illustratie. Er is geen vaste koppeling tussen deze muzieknotatie en dB. Aardig zou zijn leerlingen die met deze muzieknotatie vertrouwd zijn in de praktijk eens zo'n koppeling te laten zoeken.
- In hoofdstuk 5 (par. 5.2) komt het begrip dynamiek terug.
3. Vervolg op § 2.c, activiteit 2. Meting niet zo eenvoudig vanwege triggering van oscilloscoop en moeilijkheid om een constante toon enige tijd vol te houden. Sommige instrumenten zijn hiervoor geschikter dan andere.

- 4./5. Een muziekinstrument komt hier als geheel aan bod. Er is een samenhang met alle andere onderzoekjes.
6. Een interview met een stemmer zou hierbij kunnen worden overwogen.

SCHOOL NR. 19/20 – 18 JUNI 1983

DE MIDDENSCHOOL ALS TROMBONE

Een trombone is een koperen blaasinstrument. Er is een goed Nederlands woord voor, bazuin, maar dat is een beetje archaisch en nogal sterk verbonden met onheilsprofetieën uit de Apocalyps. Een meer platvloerse benaming is schuiftrompet. Toch geeft dit woord al beter aan wat er met dit muziekinstrument aan de hand is. De uiteraard holle buizen kunnen met behulp van verlengstukken in en uit elkaar schuiven. Op die manier wordt de lengte van de luchtkolom veranderd. We weten nog uit de natuurkundeles dat dan de amplitudo gewijzigd wordt. De knopen en buiken komen dichterbij elkaar of verder van elkaar af te liggen en dat heeft consequenties voor de toonhoogte.

Zo'n trombone is niets zonder lucht. De blazer brengt die dan ook binnen.

De middenschool is net een trombone. Ze is voor haar inhoudelijke vulling afhankelijk van wat de haar omringende maatschappelijke lucht inhoudt. En ze moet vaak maar afwachten welke geleerde, politicus of beleidsmaker haar ter hand neemt om die ideeënvulling tot een conceptuele melodie ineen te schuiven.

Sommige professoren lijken alleen maar hoge tonen te kunnen spelen, nadat ze eerst een jaar of tien het werk aan de plaatselijke fanfares van Heythuyzen tot Franeker hadden overgelaten, amateurs uiteraard maar met de bevologenheid van fervente hobbyisten.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

LUISTEREN NAAR MUZIEK

De bedoeling

Een thema Muziek zou niet compleet zijn als er geen aandacht werd geschonken aan de beleavingskant: het ontvangen en *waarderen* van muzikale patronen. Voor een groot deel gaat het dan om *subjektieve* aspecten, zowel in emotionele zin (mooi-lelijk, ruig-vloeiend, enz.) als ook op het gebied van de fysika: de wetenschap, die zich bezighoudt met de *perceptie* van geluid en muziek beweegt zich op de grens van fysika en psychologie. Dit grensgebied wordt dan ook wel de psycho-fysika genoemd.

Vraag daarbij is of de persoonlijke *waardering* beïnvloed wordt, of tenminste beter begrepen, als je meer weet van de manier waarop de *waarneming* tot stand komt: in het algemeen of bij iemand persoonlijk. Die vraag leggen we de leerlingen ook voor aan het einde van par. 3.3.

Andere redenen om aan het "horen" aandacht te besteden zijn:

- als voorbeeld van de toepasbaarheid van de natuurkunde op het eigen lichaam, een element dat in de HAVO-bovenbouwkursus (te) weinig aan bod komt;
- als onderdeel van het concept, dat (muzikale) informatie wordt overgedragen via het *bron - medium - ontvanger* -systeem;
- als onderwerp dat nauw aansluit bij de beleavingswereld van deze groep leerlingen; waarmee vooral ook de paragraaf over gehoorstoornissen kan worden gelegitimeerd.

Hoofdpunten

- a. Inzicht in de zeer ingewikkelde (en fascinerende) werking van het gehoororgaan
- b. Vergelijking van het eigen gehoor met standaardnormen of gemiddelden op aspecten zoals gehoorgrenzen en -drempels, verschiltönen, consonantie en dissonantie en maskering
- c. Onderzoek in hoeverre kennis over de eigen waarneming van muziek bijdraagt aan de waardering ervan
- d. Gehoorstoornissen en wat daaraan te doen is.

Uitwerking lessenplan

Er staan voor hoofdstuk 3 drie lessen gepland. Deze kunnen als volgt worden verdeeld:

- | | |
|-------|---|
| les 1 | inleiding over het horen, beschrijving van de werking van het oor, rekenen met geluidsniveau's (par. 3.1 en 3.2) |
| les 2 | klassikale invulling van de P.G.B. (de persoonlijke gehoorbeschrijving) met behulp van een aantal luistertestjes (par. 3.3) |
| les 3 | napraten over de gehooreigenschappen, werken aan gehoorstoornissen (par. 3.4). |

Aanwijzingen per paragraaf

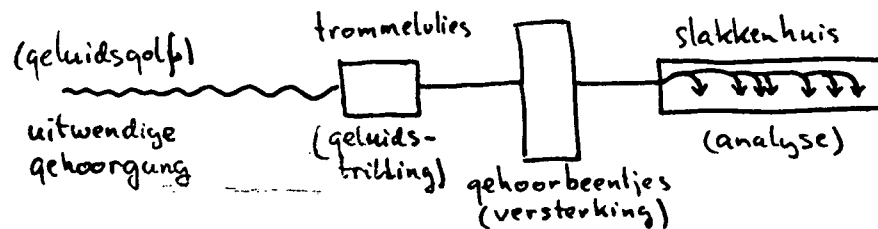
- 3.2 • Bij de beschrijving van het oor kan misschien de nadruk gelegd worden op de fysische aspecten van de werking ervan: b.v. de resonantie in de uitwendige gehoorgang, de trillingen van het trommelvlies, de hefboomwerking van de gehoorbeentjes en de voortplanting van de geluidsgolven door de vloeistof in het slakkenhuis.
- Twee aspecten worden in de tekst naar voren gehaald: het horen van *geluidsniveau* en van *toonhoogte*. Het eerste moet enig inzicht verschaffen in het logaritmische karakter van het oor, het tweede in het analyserende karakter ervan.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

- De 'log'-werking bij het berekenen van het geluidsniveau wordt gepresenteerd als een rekenkunstje, uit te voeren op de rekenmachine. Voor leerlingen moet het doel zijn om die ingewikkelde intensiteitsschaal met vervelende 10-machten om te kunnen zetten in een meer hanteerbare schaal. Bijlage D6 bevat een voorbeeld van een werkblad voor de leerlingen die nog niet vertrouwd zijn met het begrip 'logaritme'.
- Het idee van de Fourier-analyse doordat het gehoor zou moeten aansluiten bij de experimenten van hoofdstuk 2.

Toelichting bij de opgaven

het oor 1. Ons blokschema zou zijn:



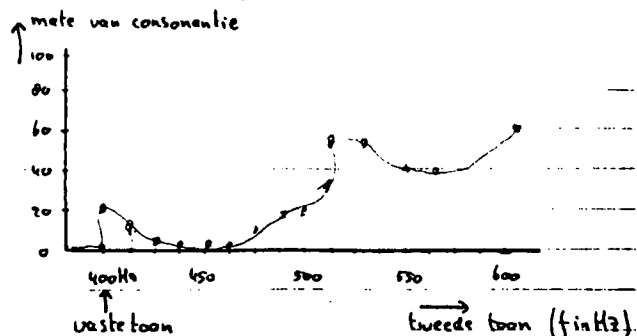
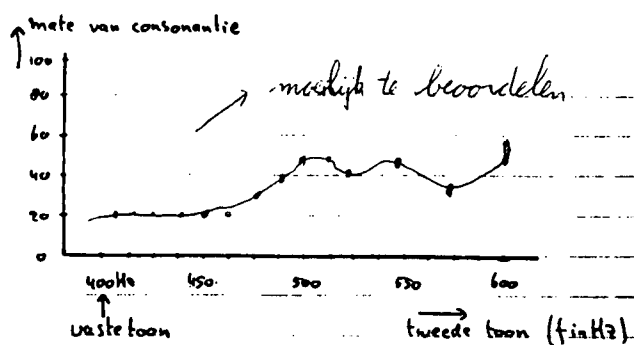
2. • 63 dB
 - 1 tuba: 85 dB, 2 tuba's: 88 dB, verschil 3 dB; een faktor 2 horen zou een verschil van 10 dB moeten zijn.
 - $I = 1 \text{ W/m}^2$
 - Noodzakelijke vraag voor één van de luistertoetsjes van par. 3.3 (over de gehoordrempel)
Het geluidsniveau vermindert van 69,5 dB naar 60 dB en van 64,7 naar 55,2: in beide gevallen dus evenveel.
 3. • Verschillen in frequenties in ons toonsysteem komen aardig overeen met konstante afstanden op basilair membraan.
 4. • De grondfrequentie is 110 Hz: plaatsen op het basilair membraan zijn dus ca. 32, 29, 26, 24, 23 mm enz.
- 3.3 • Vanwege het bijzondere en nogal nieuwe karakter van deze paragraaf zijn de luistertoetsjes al eenmaal uitgeprobeerd in twee 4e-klassen. Op grond van die ervaringen zijn wat dingen verbeterd en kunnen we ook enige suggesties geven.
- De bedoeling van par. 3.3 is om de leerlingen enig inzicht te geven in eigenschappen van het gehoor en ook hoe hun eigen gehoor zich steeds gedraagt. Daartoe vullen ze een P.G.B. (Persoonlijke Gehoor Beschrijving) (Zie bijlage D 3) in, door goed te luisteren bij een aantal luistertestjes. Omwille van de uniformiteit zijn alle onderzoekjes geschreven in termen van leerlingactiviteiten. Natuurlijk zouden de leerlingen deze onderzoekjes ook in groepjes kunnen doen en rouleren of aan elkaar rapporteren. Deze manier van werken zal echter snel op materiaalproblemen stuiten. Daarom zijn de testjes uitgeprobeerd in een klassikale vorm. Er is daarvoor een cassettebandje gemaakt, waarop enkele van de testjes in de volgorde van het boek zijn opgenomen.
 - Als *klassikale* les zou het als volgt kunnen verlopen:

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

Vertellen over	test nr.	materiaal	opmerkingen
• verschil <i>luidheid</i> en <i>geluidsniveau</i> foon → decibel	1 (ca 5 min)	- 1 toongenerator - 1 box (goede weergave lage tonen) (- frequentiemeter voor directe aflezing door de leerlingen)	• voor alle testjes moet het erg stil zijn. • het vergelijken met klasgenoten gebeurt deels vanzelf, deels moet je de leerlingen ertoe uitnodigen. • de verschillen in gehoor grenzen in één leeftijdsgroep zijn klein.
• luidheid is afhankelijk van de frequentie	2 (5-10 min)	- de voorbespeelde cassetteband - cassetterecorder - dB-meter	• om hoofdpijnklachten te voorkomen kan de recorder ook wat zachter worden afgesteld (b.v. 60 dB); de verschillen met 70 dB zijn zo klein, dat de getallen op de P.G.B. niet aangepast hoeven te worden. • als iedereen het "even harde geluidsniveau" te pakken heeft, kan de proef worden gestopt en kun je overgaan naar de volgende frequentie.
• gehoordrempel is een zeer persoonlijk gegeven (ondanks de suggestie dat 0 foon een "absolute" drempel zou zijn)	3 (5-10 min)	- toongenerator - dB-meter	• een lastige test, die zeker een goede voor- of nabespreking vergt, vanwege het meten van <i>verschillen</i>. • een experimenteel probleem is, dat het verlies aan dB niet voor elke plaats in de klas gelijk is; van te voren even uitproberen, waar de leerlingen het beste kunnen zitten. • eventueel kan dit testje ook overgeslagen worden
• wat gebeurt er als er twee tonen van verschillende frequentie tegelijk trillen?	4 (ca 5 min)	- twee stemvorken met verstelbare ruiten (- of twee toongeneratoren met luidsprekers)	• het is de bedoeling, dat duidelijk wordt, dat een <i>zweving</i> veroorzaakt wordt door de samenstelling van geluidstrillingen <i>buiten</i> het oor; <i>verschilt</i> tonen ontstaan <i>binnen</i> het oor.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

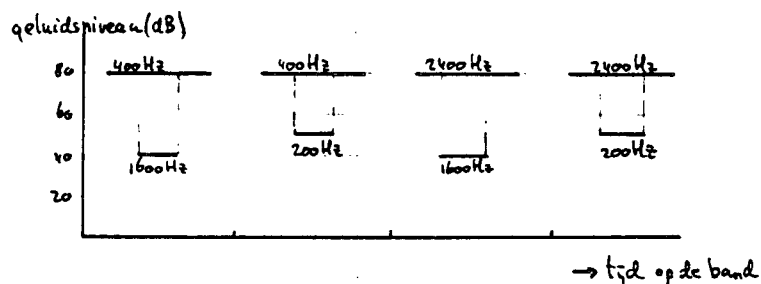
Vertellen over	test nr.	materiaal	opmerkingen
	5		(De verwarring, ook onder fysici, heeft te maken met het begrip verschilfrequentie, dat ook bij zwevingen wordt gebruikt, om aan te duiden hoe vaak het geluid moduleert.) ● opdracht 5 kan als huiswerk worden opgegeven.
● een verschiltoon is een toon, die je echt <i>hoort</i>, terwijl hij niet is voortgebracht door de geluidsbron	6 (ca 5 min)	- twee toongeneratoren (- eventueel een derde) - luidsprekers	● een zeer verrassende proef, waarbij je één verschiltoon met name (met frequentie $2f_1 - f_2$) goed hoort, omdat deze in frequentie <i>sakt</i>, terwijl f_2 stijgt. ● een wetenschappelijke methode is om de verschiltoon te laten zweven met een "echte" derde toon van nagenoeg dezelfde frequentie, maar deze methode lijkt ons didactisch gezien wat ingewikkeld. ● achtergrondinformatie over onderzoek in verschillen is te vinden in bijlage I.1
● akkoorden kunnen mooi en lelijk klinken en niet iedereen denkt daar hetzelfde over!	7 (ca 5 min)	- de voorbespeelde cassetteband - cassetterecorder	● het is opvallend, hoe cultuur en gewenning een rol spelen bij de beoordeling van con- en dissonant; leerlingen vinden het een moeilijke, maar wel leuke opdracht. ● korte uitleg over het waarderingssysteem is vereist.



Twee voorbeelden van leerlingen

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

Vertellen over	test nr.	materiaal	opmerkingen
	(7)		• op de band staan akkoorden van 400 Hz met achtereenvolgens 410, 420, 430, 440, 450, 460, 480, (kleine terts), 500 (grote terts), 517, 533, (kwart), 550, 575, 600 (kwint) Hz.
• geluiden, tonen kunnen wegvallen tegen hardere andere geluiden: gemaskeerd worden	8 (ca 5 min)	- de voorbespeelde cassetteband - cassette recorder	• maskering als zodanig is een bekend verschijnsel, minder bekend is, dat lage tonen beter maskeren en slechter gemaskeerd worden. • bij tijdgebrek kan deze test ook worden overgeslagen. • op de band staan achtereenvolgens:



• het oor kan nog veel meer heel erg knappe dingen, b.v. het scheiden van verschillende klanken uit een totaal golfsignaal	9 (ca 5 min)	- de voorbespeelde cassetteband - cassette recorder	• een selectie van enkele fragmenten van demonstratieplaatjes van het Instituut van Perceptie Onderzoek in Eindhoven. • een aardigheidje, kan eventueel worden overgeslagen. • in bijlage D.4 de Engelse informatie bij de testplaatjes.
• de slotvraag: wat dragen deze testjes, en de kennis die je ermee hebt verkregen bij tot je waardering	10	- de voorbespeelde cassetteband - cassette recorder	• deze test is een noodzakelijk slot van de serie testjes, omdat hij de relatie met de <i>beleving</i> van muziek weer tot stand brengt. • de fragmenten zijn geselecteerd door een

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

Vertellen over	test nr.	materiaal	opmerkingen
van muziek; of wordt dat bepaald door allerlei andere factoren?	(10)		muziekdeskundige en worden ook gebruikt voor de wat uitgebreidere, originele versie van het "polaritätsprofil" (zie fig.); - het betreft: 1. Louis Armstrong, New Orlean Function 2. Mendelssohn, Symfony no. 4 3. Wayne Country, Show the Gate of Heaven

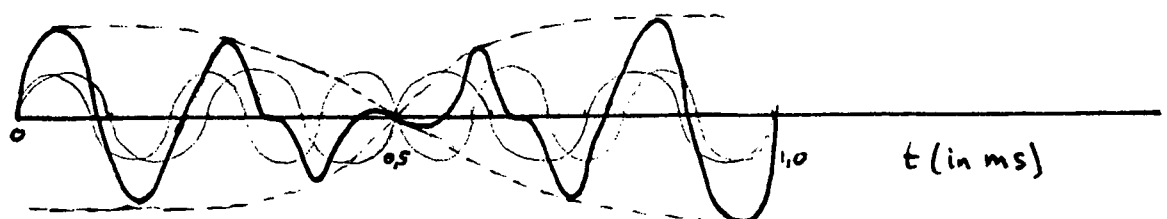
Polaritätsprofil (Einzeleinsufung)

	1	2	3	4	5	6	
langsam							schnell
bleich							farbig
schwer							leicht
eckig							rund
kühl							gefühlvoll
verschwommen							klar
geheimnisvoll							durchschaubar
anstrengend							erholsam
verträumt							nüchtern
oberflächlich							tiefsinnig
stark							schwach
einfach							kompliziert
lebhaft							müde

verkürzte Wiedergabe nach Kleinen (L 201)

toelichting bij de opgaven

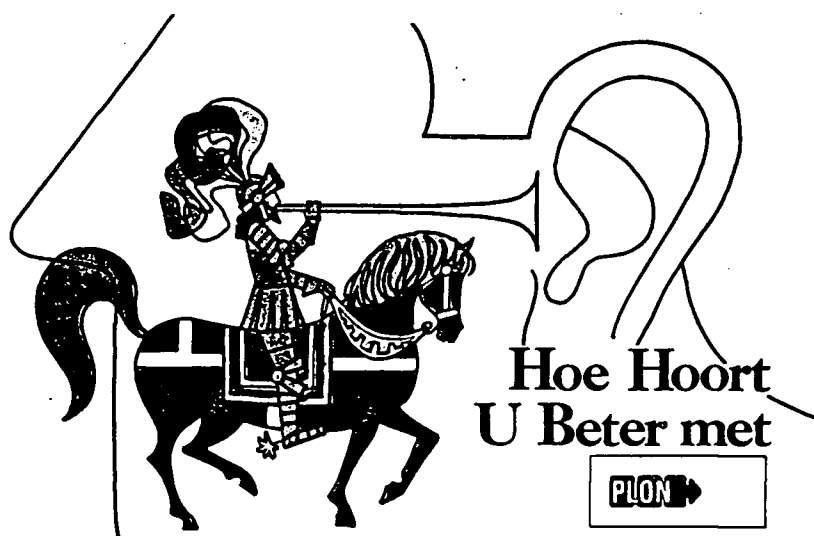
5. zwevingen



OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

- 6. verschiltoon ● De duidelijkste verschiltoon heeft een frequentie $2f_1 - f_2$. Als f_2 stijgt, zal $2f_1 - f_2$ dalen.
- 7. consonantie ● Een grote tert op de piano bevat ook allerlei boven-tonen, zodat er eerder dissonante frequentieverhoudingen optreden.
- 8. maskering ● De lage tonen van de fabriekshal maskeren beter.
 ● Mensen zullen in een lawaaiige ruimte harder praten!

3.4



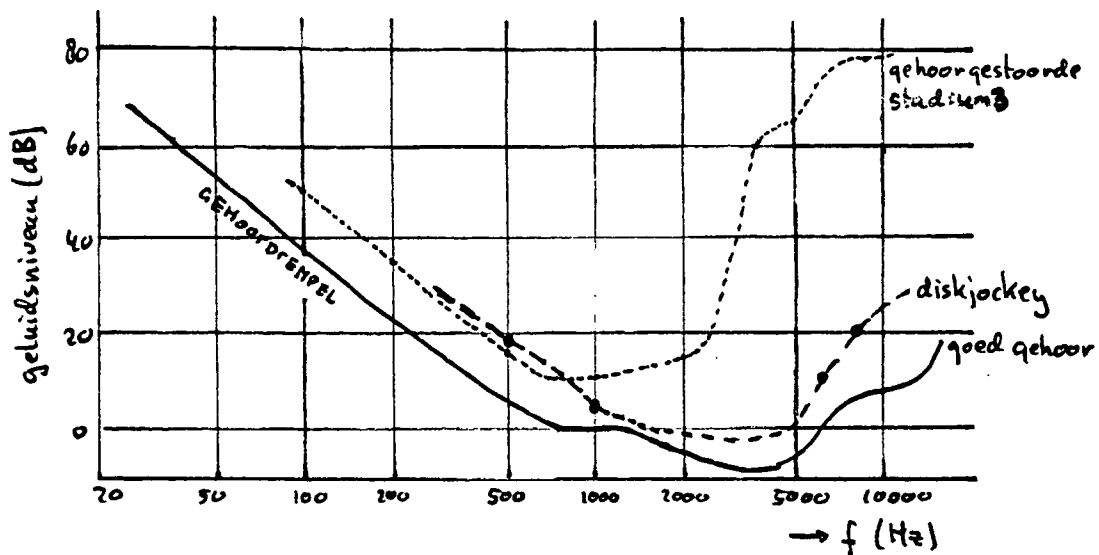
- Deze paragraaf heeft enigszins het karakter van een verwerking van het voorgaande, b.v. met betrekking tot gehoordrempels, geluidsniveau's en luidheid.
 Bovendien is doofheid een vaak wat miskend gebrek en komt het in meer of minder ernstige mate veel voor bij jongeren. Het idee van gehoorschade door diskotheekbezoek bleek echter wat opgeblazen te zijn (zie bijlage I.2 voor een recent onderzoek naar deze vorm van gehoorschade).
- De leerlingen kunnen deze paragraaf vrij goed zelfstandig doorwerken.

toelichting bij de opgaven

- 1. audiogrammen
 - Het gehoorverlies bij de hoge tonen.
 - 3000 en 5000 Hz.
 - Een groot deel van de klankkleur verdwijnt, muziek wordt mager, kaal.
 - Gehoordrempel bij 4000 Hz is ca. -8 dB; het gehoorverlies is 15 dB; de gehoordrempelwaarde van Sanne is dus 7 dB bij 4000 Hz.
 (Iene Mienie van Sesamstraat moet dus keihard!)

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

3. diskotheekbezoek • ca 6,0 dB.
 • zie figuur 3.4.
4. gehoorapparaat • zie figuur
 • Dat zou een dolle boel worden. Een "ringleiding"
 is een soort zender waardoor het gehoorapparaat
 een elektro-magnetisch signaal kan versterken
 i.p.v. een geluidsgolf.



METEN VAN GEHOORGRENZEN MET BEHULP VAN EEN COMPUTER (bij aktiviteit 3.3.1)

Bij de afdeling Didaktiek der Natuurkunde van de Universiteit van Amsterdam is een experiment ontwikkeld waarin leerlingen hun gehoorgrenzen kunnen bepalen voor een gebied van 250-12.000 Hz. Bij het experiment wordt gebruik gemaakt van een AD-converter, een verzwakkerskastje en een Commodore-programma.

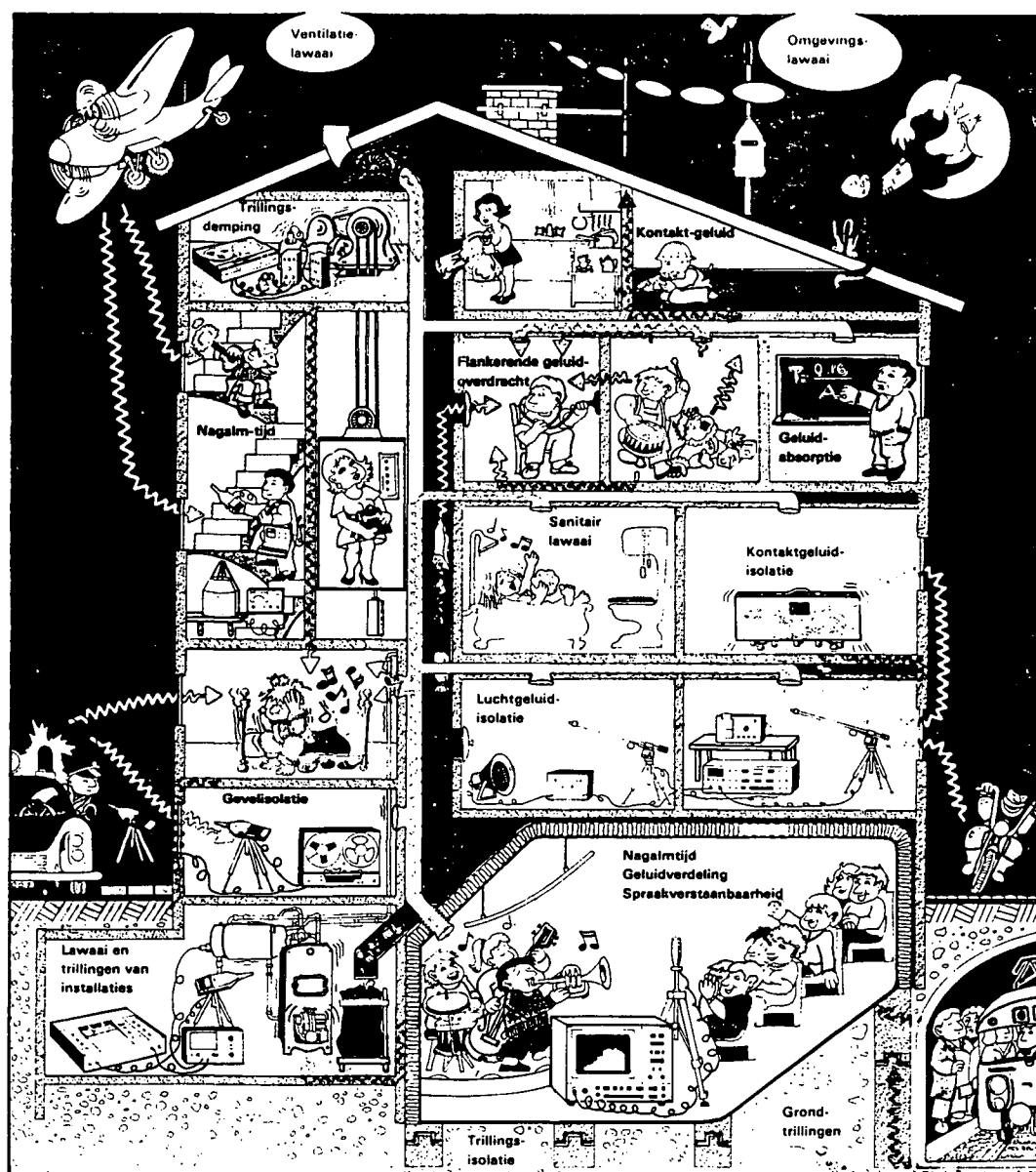
Het programma is nog niet in de handel. Op beperkte schaal kan de apparatuur worden uitgeleend. Op de S.G. Huizermaat is naar tevredenheid met het experiment gewerkt. Nadere inlichtingen: Ton Ellermeyer,

afd. Didaktiek der Natuurkunde,
 Nieuwe Achtergracht 170,
 1018 WV Amsterdam,
 tel. 020-5222963.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

AKOESTIEK

Voor het beoordelen van de akoestiek van een ruimte spelen een aantal factoren een rol: de nagalmtijd (in verschillende frequentiegebieden), de frequentiekaracteristiek, de diffusiteit van het geluid in de ruimte (d.w.z. de mate van plaatsafhankelijkheid van het geluidsniveau; vooral bij lage frequenties kunnen staande golven zorgen voor waarneembare verschillen in geluidsniveau op verschillende plaatsen in een ruimte), de mate van isolatie tegen geluiden van buiten de ruimte enz.



OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

In dit hoofdstuk beperken we ons tot de *nagalmtijd* en de *frequentie-karakteristiek*. Kenmerkende eigenschappen van de ruimte die de grootte van de nagalmtijd en de 'vlakheid' van de frequentie-karakteristiek bepalen, zijn de mate van (frequentie-afhankelijke) absorptie en de afmetingen/vorm van de ruimte. Bij het verbeteren van de akoestiek van een ruimte is meestal de mate van absorptie de enige variabele.

<i>uitwerking lessenplan</i>		
lesnr.	onderdeel	tijdsduur in minuten
11	inleiding op het hoofdstuk, opdracht 1,2	
	par. 4.1	25
	(aansluitende) klassediscussie	5
	theorie over voortplanting geluidgolven in lucht (w.o. uitvoering opdracht 2,3 par. 4.2)	15
	huiswerk: lezen par. 4.2 en 4.3 (tot 'keuze- onderzoek'), uitvoeren opdracht 4,5 par. 4.2.	
12	(evt.) vragen beantwoorden n.a.v. huiswerk kiezen/verdelen onderzoeksopdrachten 1 t/m 5	
	par. 4.3	15
	opstellen meetplan/voorbereiding uitvoering onderzoek	30
13	uitvoering onderzoek	45
	huiswerk: rapportage voorbereiden	
14	rapportages	45
15	bepaling 'ideale nagalmtijd' (opdracht 1, par. 4.4)	10
	klassegesprek over mogelijkheden tot akoes- tiek-verbetering n.a.v. een keuze uit de opdrachten 2 t/m 8 par. 4.4	35

bedoeling

- de betekenis van nagalmtijd en frequentiekarakteristiek van een ruimte voor de kwaliteit van de overdracht van muziek van bron naar ontvanger aangeven (nagalmtijd en frequentie-karakteristiek als criteria voor overdrachtskwaliteit).
- Inzicht geven in de relaties tussen 'waarneembare' eigenschappen van een ruimte (absorptie, afmetingen, vorm) en de hiervoor genoemde kwaliteitscriteria.
- Manipuleren met 'waarneembare' eigenschappen van een ruimte ter verbetering van de overdrachtskwaliteit.

leerlingactiviteiten

- Luisteren/kijken naar cassetteband/diaserie.
- Luisteren naar leerkracht/lezen van tekst uit het themaboek.
- Zelfstandig onderzoek doen.
- Rapporteren over het verrichte onderzoek.
- Verwerkingsopdrachten uitvoeren.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

didaktische aanwijzingen

4.1 INLEIDING

● Opdracht 1/2: NAGALM/FREQUENTIE-KARAKTERISTIEK

De cassetteband/diaserie is bedoeld om de leerlingen te oriënteren op de 'waarneembare' eigenschappen van een ruimte (absorptie, afmetingen) die invloed uit oefenen op de grootte van de nagalmtijd en de 'vlakheid' van de frequentie-karakteristiek. De cassetteband brengt muziek ten gehore, opgenomen in ruimtes met verschillende mate van absorptie en van verschillende afmetingen; de bijbehorende dia's brengen deze verschillen in beeld. Bij de opeenvolging van ruimtes is steeds één variabele (absorptie of grootte) gewijzigd. In bijlage D. 5 is het draaiboek voor deze band/diaserie weergegeven.

De nabespreking (kort!) van opdracht 1 en 2 kan de volgende konklusies opleveren:

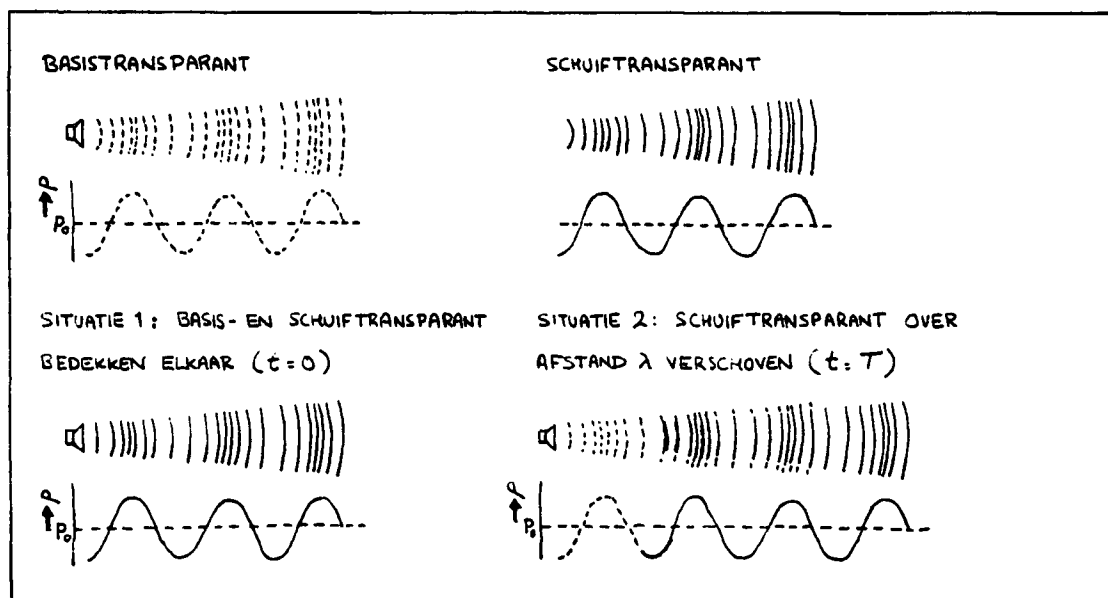
- de hoeveelheid nagalm hangt af van de mate van absorptie in een ruimte (hoe groter de absorptie, hoe minder nagalm) en van de afmetingen van een ruimte (hoe groter de ruimte, hoe meer nagalm);
- de frequentie-karakteristiek (de verhouding in geluidsniveau van hoge en lage tonen) hangt af van de mate van absorptie in een ruimte (hoe groter de absorptie, hoe zwakker de lage tonen klinken ten opzichte van de hoge tonen).

Het lijkt goed om voorafgaand aan de band/diaserie (kort!) in te gaan op het begrip 'absorptie', bijv. aan de hand van ervaringen bij het luisteren naar muziek in de open lucht, in een sporthal en in een (concert)zaal. De galm (of zelfs echo) in een sporthal heeft te maken met (herhaalde) weerkaatsing van geluid tegen wanden en plafond; waardoor is dat verschijnsel niet/veel minder aanwezig in de open lucht of in een (concert)zaal?

Het is mogelijk om bij de nabespreking van de band/diaserie al in te gaan op de vraag aan welke eisen nagalm en frequentie-karakteristiek moeten voldoen om de overdrachtskwaliteit 'goed' te kunnen noemen. Een dergelijke discussie past echter beter in par. 4.4.

4.2 VOORTPLANTING EN ABSORPTIE

Aansluitend op de nabespreking van opdracht 1 en 2 van par. 4.1 kan kort ingegaan worden op de voortplanting en absorptie van geluid in een ruimte. Het voortplantingsmechanisme kan snel duidelijk gemaakt worden met behulp van een transparant op de overhead projector.



OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

● Opdracht 1: GOLFLENGTE BEPALEN

Dit is een herhaling van een stukje theorie uit hoofdstuk 2, en kan zo nodig vervallen.

● Opdracht 2: GEHOORGRENZEN

Deze opdracht geeft een indruk van de afmetingen van de golven in een geluidsgolf in het hoorbare frequentiegebied. Het belang hiervan zit in het feit dat kamerresonanties binnen dit golflengtegebied liggen. De afname van het geluidsniveau met toenemende afstand tot de bron is van belang bij de verklaring van het verschijnsel 'nagalm' in par. 4.3: late reflecties in een ruimte hebben een langere weg afgelegd van bron tot ontvanger, en het geluidsniveau van die late reflecties is dus lager ('uitsterven' van geluid).

● Opdracht 3: AFNAME VAN HET GELUIDSNIVEAU

Laat de leerlingen de regel van geluidsniveau-afname met de afstand tot de bron 'ontdekken'. Goed als oefening in het rekenen met logaritme (na de introductie daarvan in hoofdstuk 3), maar niet essentieel voor het begrijpen van hoofdstuk 4. Je kunt ook zelf het bedoelde diagram presenteren, en de leerlingen vragen daar een konklusie uit te trekken.

● Opdracht 4.

Bedoeld als een verwerkingsvraag bij opdracht 3. (Antwoord: iets meer dan een meter of vier.)

Over absorptie hoeft niet meer gezegd te worden dan de definitie van absorptie-coëfficiënt en de frequentie-afhankelijkheid van deze grootheid (met name het absorptie-gedrag van poreus materiaal, dat in de praktijk meestal als enige voor de in een kamer aanwezige absorptie zorgt).

● Opdracht 5: DE ABSORPTIE IN EEN KAMER

De leerlingen bepalen de (totale) absorptie in een ruimte. Zij moeten daarbij gebruik maken van de gegevens over de absorptie-coëfficiënt op blz. 44/45 van het themaboek. (Antwoord: $S = 8.4.0,15$ (plafond, gipsplaat op latwerk) + $8.4.0,4$ (vloer, tapijt op schuimrubber) + $8.2.2.0,04$ (lange wand, baksteen) + $8.2.2+0,02$ (lange wand, pleister) + $4.2.2.0,1$ (korte wand, licht gordijn) + $4.1.7.0,1$ (korte wand, glas) + $4.0.5.0,02$ (korte wand, pleister) $\approx 20 \text{ m}^2$ (de absorptie-coëfficiënt van lichte gordijnen is een schatting - de gegevens over deze absorptie-coëfficiënt zijn abusievelijk niet in de diagrammen op blz. 44 van het themaboek terecht gekomen); het plaatsen van een bankstel levert een extra absorptie van $14.0,8 - 5.0,4$ (verdwijndend tapijtoppervlak, naar schatting 5 m^2) $\approx 9 \text{ m}^2$).

Het gaat bij deze vraag niet om exacte antwoorden, maar wél om

- herkennen van de factoren die de absorptie in een ruimte bepalen: materiaal, oppervlakte en frequentie;
- de *methode* van bepalen van de totale absorptie in een ruimte;
- het rekening houden met het feit dat een deel van de eerder berekende totale absorptie *verdwijnt* als het ene materiaal vervangen wordt door het andere.

● Opdracht 6 t/m 9 zijn fakultatieve onderzoeksopdrachten. Ze kunnen door kleine groepen leerlingen parallel gedaan worden, als je er voor kiest om méér dan de geplande 5 lessen voor hoofdstuk 4 uit te trekken. Deze opdrachten kunnen ook dienst doen als een aanzet tot een onderzoek in de keuzeperiode (hoofdstuk 6).

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

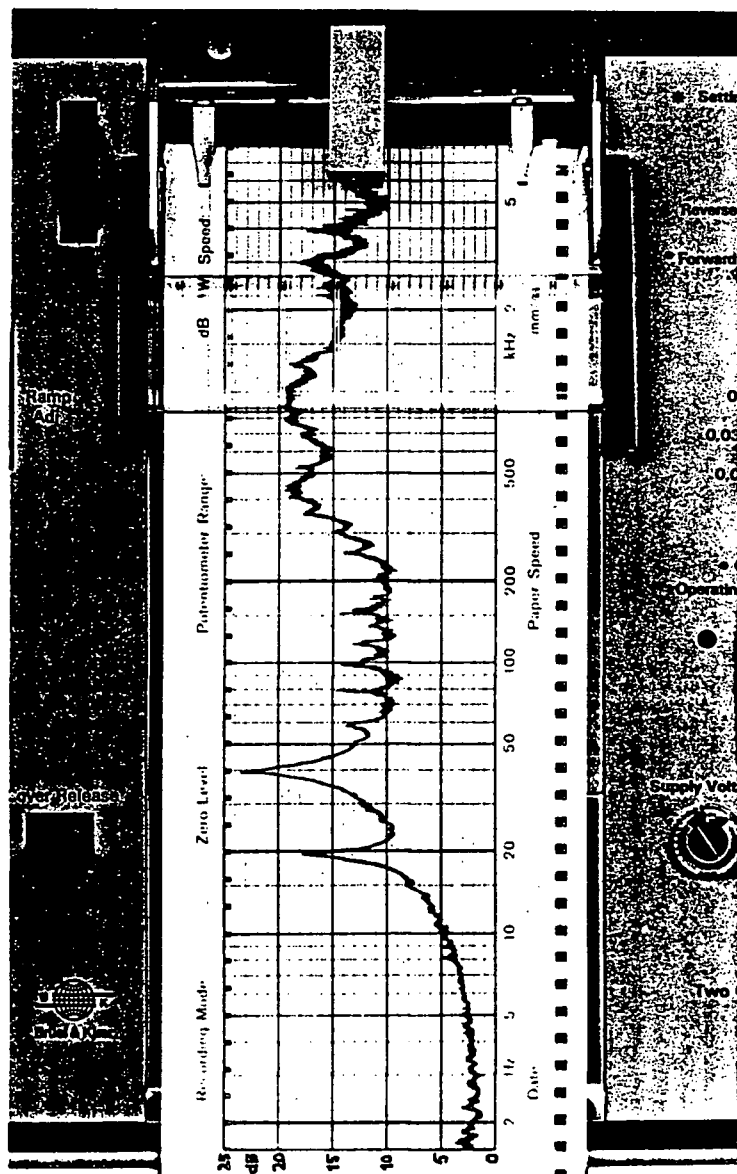
4.3 NAGALM EN RESONANTIE

Het ontstaan van nagalm wordt verklaard uit een simpel model (themaboek blz. 46): hoe later geluid van een pulsbron bij een luisteraar aankomt, hoe meer reflecties dit geluid heeft ondergaan, hoe langer de afstand is die het geluid heeft afgelegd, en dus hoe lager het geluidsniveau (het geluidsniveau in het galmveld daalt met de tijd). Dit model wordt ook gebruikt om de invloed van de grootte van de ruimte en van de absorptie in de ruimte op de nagalmtijd kwalitatief te verklaren. De empirische formule van Sabine voor de nagalmtijd komt daardoor niet helemaal uit de lucht vallen.

Bij een verklaring voor het optreden van resonanties kan teruggegrepen worden op de ervaringen in hoofdstuk 2. Het optreden van 'scheef' in de ruimte staande golven is nieuw in vergelijking met hoofdstuk 2, maar het is niet de bedoeling dat leerlingen het achterliggende mechanisme kennen. Dat geldt ook voor de formule waarmee alle resonantiefrequenties van een ruimte uitgerekend kunnen worden: het is een rekenregel die bij de onderzoeken 3 en 4 gebruikt kan worden.

De weergave van de resonantiefrequenties van een ruimte in het diagram op blz. 48 van het themaboek is met opzet op een logaritmische schaal gedaan: op die manier geeft het diagram een indruk van hoever de resonanties voor het menselijk gehoor uit elkaar liggen.

De keuze-onderzoeken kunnen door de leerlingen parallel in kleine groepen gedaan worden (mits voldoende apparatuur aanwezig is).



frequentie-karakteristiek

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

● Opdracht 1: NAGALM METEN IN EEN MODELKAMER

Benodigde apparatuur: toongenerator, luidspreker, mikrofoon, oscilloscoop.

De meetmethode is lastig, vandaar dat deze min of meer in de vorm van een 'kookboek' is gegeven. De truc met de blokspanning maakt het mogelijk om de nagalmtijd-kromme op een normale oscilloscoop zichtbaar te maken (als dalende e-macht), doordat het nagalm verschijnsel zich periodiek herhaalt.

De formule van Sabine geldt alleen in grote ruimtes, zeker niet bij modelonderzoek in een kist. De nagalmtijd die in het model wordt gemeten, zal dus zeker niet overeenstemmen met een berekende nagalmtijd. Wél kunnen de gevonden verbanden tussen nagalmtijd, volume en absorptie overeenstemmen met de verbanden zoals die uit Sabine's formule zijn af te lezen.

● Opdracht 2: NAGALMTIJD METEN IN EEN KAMER

Benodigde apparatuur: toon- of ruisgenerator, luidspreker, mikrofoon, geluidsniveau-schrijver.

Een geluidsniveau-schrijver zal op school in het algemeen niet aanwezig zijn. De truc met de toongenerator en oscilloscoop lukt in dit geval niet, omdat de te meten nagalmtijden daarvoor te lang zijn. Een (op dit moment nog niet gerealiseerd) alternatief is het opslaan van het mikrofoon-signaal in een computergeheugen. Opdracht 2 zal dus dit jaar waarschijnlijk niet gekozen kunnen worden. In bijlage I.3 geven we wat informatie over praktijkmetingen van de nagalmtijd.

● Opdracht 3: RESONANTIEFREQUENTIES METEN IN EEN MODEL

Benodigde apparatuur: toongenerator, luidspreker, mikrofoon, oscilloscoop.

De leerlingen wordt gevraagd om eerst de tien laagste resonantiefrequenties te berekenen (met de formule op blz. 48 van het themaboek). Bij het meten van de frequentie-karakteristiek is het dan makkelijker om de resonantie te zoeken: je weet waar je zoeken moet. Het berekenen van de tien *laagste* resonantiefrequenties is, behalve een zaak van geduld, er ook een van nauwkeurig en systematisch werken.

Bij het optreden van resonantie (= staande golf) in een ruimte varieert het geluidsniveau in de ruimte van plaats tot plaats (amplitude is plaats-afhankelijk in een staande golf). Het is dus mogelijk dat de mikrofoon net op een zodanige plaats staat waar het geluidsniveau relatief laag is. Daardoor kunnen bij het opmeten van de frequentie-karakteristiek bepaalde resonantiefrequenties 'gemist' worden. Herhaling van de metingen met de mikrofoon op een andere plaats maakt de kans op 'vermissing' van resonantiefrequenties kleiner.

● Opdracht 4: RESONANTIEFREQUENTIES METEN IN EEN KAMER

Zie opdracht 3.

● Opdracht 5: HET OPBREKEN VAN STAANDE GOLVEN

Benodigde apparatuur: toongenerator, luidspreker, dB-meter (of oscilloscoop).

Ruwweg is de invloed van een obstakel op een geluidsgolf pas merkbaar als de afmeting van het obstakel ongeveer even groot is als de golflengte van de golven in een geluidsgolf ($l > \frac{3}{2} \lambda$).

Het optreden van reflecties van wanden, vloer en plafond beïnvloedt de meetresultaten sterk; 'vrije-veld-condities' hebben de voorkeur (of metingen in een ruimte met zeer grote absorptie: een 'dode' kamer).

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

De uitbreiding van het onderzoek naar watergolven is niet essentieel. Dit deel van het onderzoek zou ook door een aparte groep leerlingen uitgevoerd kunnen worden, parallel aan het onderzoek naar het opbreken van geluidgolven.

Voor de onderzoeken 1 en 3 t/m 5 zijn nodig: 4 toongeneratoren, 1 dB-meter en 3 oscilloscopen. Bij de opdrachten 1 en 5 kan zo nodig gewerkt worden met een cassetteband met vooraf opgenomen signalen, zodat er nog maar 2 toongeneratoren nodig zijn. Overigens is in de apparatuurgids een bouwbeschrijving voor de zelfbouw van toongeneratoren opgenomen.

Elke onderzoeksopdracht in deze paragraaf is voorzien van een paar aanwijzingen voor het houden van een korte *rapportage* (maximaal 10 minuten per groep). Deze naar inhoud gestructureerde rapportages geven een vrij compleet beeld van de hoofdpunten uit paragraaf 4.3 (als alle opdrachten aan bod zijn gekomen). Het valt dus te overwegen om als leerkracht geen/niet al te veel tijd te besteden aan 'de theorie' in paragraaf 4.3, maar dit door de leerlingen (tijdens de rapportages) te laten doen.

4.4 EEN IDEALE LUISTERRUIMTE?

Deze paragraaf geeft een samenvatting van theorie en onderzoeksopdrachten uit paragraaf 4.2 en 4.3, gekombineerd met een aantal verwerkingsopdrachten (gericht op het verbeteren van de akoestische eigenschappen van een ruimte).

● Opdracht 1: DE IDEALE NAGALMTIJD VOOR MUZIEK

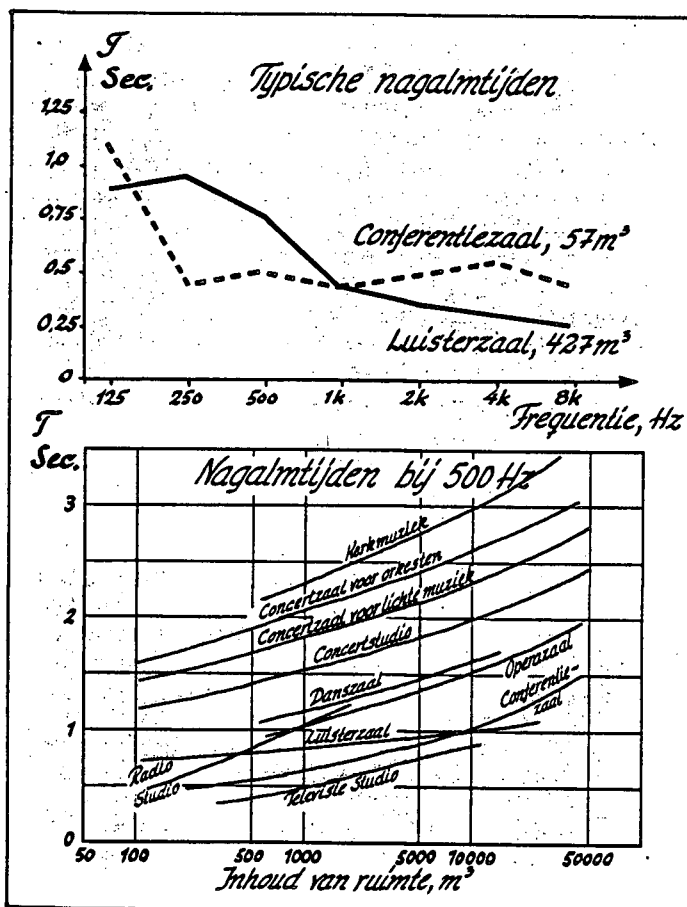
In bijlage D.5 staat het 'draaiboek' van de cassetteband, incl. nagalmtijden. Een lange nagalmtijd in de ruimte waar de band wordt afgedraaid, kan de waarneming en (beoordeling) van 'de' ideale nagalmtijd sterk beïnvloeden. De band afspelen in een zo 'doods' mogelijke ruimte dus, of voor een kleine groep die zich dicht bij de luidspreker(s) bevindt (het directe geluid overheerst dan het door het lokaal gevormde galmveld).

● Opdracht 2: NAGALMTIJD VERKORTEN

Antwoorden:

- $S = 12 \text{ m}^2$
- $\Delta S = 17 \text{ m}^2$
- Bijv. vloer. Argumenten: parket is akoestisch erg hard ($\alpha < 0,1$), dus er is een relatief grote

'Ideale' nagalmtijden
voor diverse ruimtes



OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

verbetering te bereiken bij het 'bekleden' met absorptiemateriaal; het vloeroppervlak is nogal groot (32 m^2), dus met een vloerkleed met $\alpha \approx 0,5$ (of beter: $0,6!$) wordt een extra absorptie van zo'n 16 m^2 bereikt ($\alpha \approx 0,5$ voor vloerbedekking is reëel, zie diagrammen thema-boek blz. 44).

Het aanpakken van het plafond is niet erg zinnig (vrij grote absorptie); akoestische behandeling van de muren zou kunnen, maar dat wordt dan waarschijnlijk akoestische tegel op latwerk (veel werk, duur en visueel niet zo aantrekkelijk).

● Opdracht 3: EEN TE 'DOODSE' KAMER

Antwoorden:

- Overmaat aan poreus absorberend materiaal (gordijnen, vloerbedekking, stoffen meubelbekleding e.d.)
- Poreuze absorptie verminderen (bijv. dunnere gordijnen, akoestisch 'hardere' vloerbedekking)

● Opdracht 4: EEN TE 'LEVENDIGE' KAMER

Antwoorden:

- Te weinig poreus absorptie-materiaal in de kamer
- Poreus absorptie-materiaal toevoegen (bijv. opgehangen vezelplaat voor plafond, vloerbedekking).
- Poreus absorptie-materiaal heeft een lage absorptiecoëfficiënt bij lage frequenties, en is dus niet geschikt om de nagalmtijd bij lage frequenties te verkleinen. Alternatief: absorptie-panelen.

● Opdracht 5: VOLDOENDE ABSORPTIE, MAAR

- De dubbele helling in de nagalmkromme ontstaat door het vrij lang 'doorlopen' van de reflekties tussen de twee 'akoestisch harde' wanden. In het begin worden deze reflekties nog overstemd door het grote aantal reflekties van de andere wanden, vloer en plafond. Het geluidsniveau van deze reflekties neemt echter sneller af (veel absorptie) dan het geluidsniveau van de 'flutter-echo'.
- Plaatsing van het absorberend materiaal (gelijkmatige spreiding over de gehele ruimte) is een belangrijke faktor voor een goede nagalm.

● Opdracht 6: NAGALMTIJD EN GELUIDSNIVEAU

- Bij het direkte geluid moet het geluidsniveau van de reflekties (nagalm) opgeteld worden, als het gaat om een bron die continu geluid uitzendt. Doordat dit galmveld uit zeer veel reflekties vanuit allerlei richtingen is samengesteld, is het geluidsniveau op verschillende plaatsen in de ruimte vrijwel gelijk.
- Bij meer absorptie daalt het geluidsniveau van de reflekties. Het geluidsniveau in de ruimte zal dus lager worden.

● Opdracht 7: KAMERRESONANTIES

- Te verwachten resonantiefrequenties: $f = n.v/2L = n.340/2.4,2 = n.40 \text{ Hz}$; $f = n.v/2B = n.340/2,4 = n.42 \text{ Hz}$. (afgezien van schuin in de kamer staande staande golven). Voor $n = 1,2$ liggen de resonantiefrequenties bij de twee paren muren vlak bij elkaar (rond 40 en 80 Hz). In de frequentie-karakteristiek zijn rond die frequenties dus pieken te verwachten.
- $l \approx \frac{3}{2} \lambda = \frac{3}{2} v/f = \frac{3}{2} \cdot 340/80 \approx 6 \text{ m}$. Deze oplossing is niet erg realistisch (past niet in de kamer).
- Absorptiepaneel, waarschijnlijk over de hele muur bij twee op elkaar aansluitende wanden

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

● Opdracht 8: RESONANTIE IN ZALEN

Als gevolg van de grote afmetingen liggen de laagste (ver uit elkaar liggende) resonantiefrequenties in het niet hoorbare gebied ($f < 20$ Hz).

LITERATUUR

Hoofdstuk 4

- *Bouwfysica*, prof. dr. ir. C.W. Kosten, Deftsche Uitgevers Maatschappij N.V., Delft, 1969, p. 76-163
- *Bouwakoestiek in kort bestek*, ir. P.A. de Lange, N.V. Uitgeverij Nijgh & Van Ditmar, Den Haag - Rotterdam, 1962, p. 26-45, 98-112

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

WEERGEVEN VAN MUZIEK

De bedoeling

Aansluiten bij de leefwereld van jongeren binnen een thema muziek (bijna een tautologie) betekent natuurlijk ook aandacht schenken aan weergave-apparatuur. Nu bergt dat het gevaar in zich, dat het snel verglijdt tot technisch, hobby-istisch gewauwel, waar nog al eens wat fysische onjuistheden in sluipen of waar op z'n minst veel zaken onduidelijk blijven. Een van de selectiekriteria bij dit hoofdstuk was dan ook om dat soort jargon te omzeilen. Andere eisen, die we aan het hoofdstuk stelden, waren:

- het moet een soort van *afsluiting* bieden op het concept van *bron - medium - ontvanger*, dat door het themaboek heen een nogal impliciete rol speelt, en ook op de belangrijke thema-vraag naar de factoren, die de *kwaliteit* van muziek bepalen.
 - het moet kunnen dienen als een soort *verwerkingshoofdstuk* van voorgaande onderwerpen.
 - de *werkvorm* moet vrij gekozen kunnen worden zodat (een selectie van) het hoofdstuk in twee of drie lessen klassikaal of in groepen aan bod komt.
- Op deze manier heeft hoofdstuk 5 binnen het themaboek duidelijk het karakter van een slothoofdstuk. In de gehele 4 havo-kursus kan het een eerste aanzet zijn tot het toepassen van geleerde kennis, concepten en vaardigheden in een bredere kontekst, hoewel dat nog steeds binnen de kontekst van het thema blijft.

Hoofdpunten

- Het aandragen van enige interessante, feitelijke informatie over weergaveapparatuur.
- Het verwerken van begrippen en vaardigheden uit eerdere hoofdstukken in een iets veranderde kontekst.

Uitwerking lessenplan

Als er maar 2 lessen beschikbaar zijn, zal er een selectie gemaakt moeten worden.

Belangrijkste onderdelen zijn naar onze mening:

- par. 5.1 Inleiding (bron - medium - ontvanger)
- par. 5.2 Het vastleggen van muzikale informatie
 - mikrofoons (opdracht 2)
 - signaal-ruisverhouding/dynamiek (opdracht 4)
- par. 5.3 Versterkers
 - vermogensversterking (opdracht 1)
 - frequentie-karakteristiek (opdracht 3)
 - vervorming (opdracht 5)
- par. 5.4 De luidspreker(box)
 - bouw (opdracht 1)

Toelichting bij de opgaven

- 5.1 Inleiding
 1. ● Voornamelijk allerlei muziekinstrumenten; andere voorbeelden zijn de grammofoonplaat, band, radio e.d.
 - De ontvanger was het oor; andere voorbeelden zijn een mikrofoon of je buik voor harde, lage tonen.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

2. ● Er is discussie mogelijk over de vraag wat nu precies de bron, het medium en de ontvanger zijn. Sommigen beschouwen de hele elektronische rim-ram tussen muziekinstrumenten en menselijk oor als een onderdeel van het medium. Voor anderen is er eerder sprake van een serieschakeling van systemen, waarbij een ontvanger gekoppeld is aan de bron voor het volgende systeem.

5.2 Het vastleggen van muzikale informatie

mikrofoons

1. ● Eventueel als idee voor een onderzoekje in de keuzeperiode.

2. ● Nog eens wijzen op de bij muziek gebruikte frequenties (zie figuur in par. 3.2)
 - Het trillingspatroon van de uitgangsspanning is veranderd, omdat het afgegeven signaal niet voor beide frequenties gelijk is.

grammofoonplaten

3. ● Het is gebruikelijk om over cirkels en groeven te praten, ook al is er slechts sprake van 1 spiraalvormige groef. Het totale aantal cirkels is $20 \times 33\frac{1}{3} = 667$.
 - Binnendiameter ≈ 14 cm, buitendiameter ≈ 29 cm.
 - $\bar{O} = \pi \times \bar{d} \approx 67,5$ cm.
 - Totale lengte plaatgroef $\approx 667 \times 67,5$ cm ≈ 450 m!
 - Eén groef met tussenruimte neemt $\frac{7,5}{667} \approx 0,011$ cm =

110 μ ruimte in. De tussenruimte is dus ook ± 55 μ .

dynamiek

4. ● Dan zou de naald het niet meer kunnen bijhouden $\rightarrow$ kwaliteitsverlies; ook kunnen er dan minder groeven op een plaat.
 - Dynamiek: grootste verschil in geluidsniveau's in één muziekstuk (of van een instrument).
 - Signaal-ruis-verhouding van een component uit de weergave-keten: het verschil tussen hardste passage en de ruis.

Dolby-systeem

5. ● Hoge tonen worden gemakkelijker gemaskeerd
 - Bij het Dolby-systeem is men in staat het absolute niveau van de opname ruis te verlagen.
 - Ja, dan is alleen de dynamiek wat kleiner.

Wow en flutter

7. ● Frequenties veranderen.
 - Flutter geeft snelle variaties in de frequentie, wow langzame.
 - Een zweving ontstond door het samenstellen van twee nabij gelegen frequenties.

5.3 Versterkers

Vermogensversterking

1. ● Een poging om simpele elektriciteitsberekeningen te combineren met het onderwerp van dit thema.
 - $I = 6,4 \times 10^{-8}$ A; $\bar{P} = 1,9 \times 10^{-10}$ W!
 - Versterkingsfaktor = $2,1 \times 10^{11}$!
 - Een 10x zo groot vermogen geeft 10 dB meer geluidsenergie.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

- vervorming
5. ● Nogmaals grafisch optellen.
● Omdat boventonen toch al deel uitmaken van de klankkleur.
- 5.4 Luidspreker(box)
bouw
1. ● Bij het onderzoeken van de akoestiek van een ruimte.
● $\lambda \approx d$; $f \approx 1,1$ kHz.
- stereo
4. ● In beide gevallen verschillen de hoeveelheden geluidsenergie van de beide luidsprekers, die onze oren bereiken, nogal sterk, zodat het stereo-effekt verdwijnt.
- 5.5 De hele weergave-keten
aanpassing
1. ● Een te klein vermogen, te veel versterking nodig.
2. ● $I = 2,25$ A; $P = 40,5$ W
● Onderaanpassing: $I = 4,5$ A; $P = 91$ W (mits de versterker dat kan leveren).
● Overaanpassing: $I = 1,1$ A; $P = 20$ W.
3. ● Parallel betekent onderaanpassing, serie betekent overaanpassing en verdient dus de voorkeur.
4. ● Veel van dit soort informatie is te vinden in de regelmatig verschijnende HIFI-Koopgids waarin vaak ook een aantal wetenswaardige artikelen over allerlei weergave- en opname-apparatuur zijn opgenomen.
ref.: HIFI & VIDEO Koopgids, Stichting HI-FIVE
Postbus 3140, 3003 AC Rotterdam.

OPMERKINGEN PER HOOFDSTUK

MUZIEK NAAR KEUZE

Bedoeling

In het voorstel voor het EPEP-HAVO wordt ook ingegaan op het kenmerk van differentiatie via keuze-lestijd in de cursus. Argumenten die worden aangedragen om een deel van de lestijd (15% à 20%) te vullen met activiteiten naar de "vrije" keuze van leerlingen zijn:

1. Het helpt leerlingen die op een verschillende manier leren, die verschillende activiteiten plezierig vinden en die een verschillend tempo hebben, om zo goed mogelijk de leerwinst uit de basisperiode te consolideren en te verwerken (didaktisch argument).
2. Het geeft leerlingen de mogelijkheid in te spelen op eigen interesses en probleemstellingen (motivatie argument).
3. Door een zinnige invulling in de richting van een oriëntatie op activiteiten, zoals ze in vervolgoopleidingen voorkomen, kan een betere aansluiting daarop gerealiseerd worden (doorstromingsargument).
4. Het stimuleert leerlingen meer zicht te krijgen op zichzelf, op eigen kunnen en onvermogens en op de manieren, waarop ze met anderen kunnen omgaan (pedagogisch argument).
5. Een aantal vaardigheden, zoals rapporteren en het opzetten van een onderzoek, die belangrijk genoeg zijn om aandacht aan te besteden, kunnen beter geoefend worden in een gedifferentieerde opzet (doelstellingen argument).

Nu is een bekend probleem dat dergelijke keuze-periodes, dat ze nogal eens in de verdrukking komen, worden opgeofferd aan de "basis" van het thema of worden gebruikt voor oneigenlijke doelen, als repeteer-activiteiten, examentraining e.d.

Wil je landelijk gezien een kans maken tot een substantiële reductie van de leerstoflijst te komen, juist om keuzeactiviteiten mogelijk te maken, dan zal moeten worden geprobeerd op de proefscholen om aan dergelijke periodes een zinvolle invulling te geven.

Dat heeft enkele consequenties voor de mate van "vrijheid" van de leerlingen in deze keuzeperiode.

Wij gaan van 5 "principes" uit:

- de onderwerpkeuze valt binnen de thematische kontekst van het thema, of sluit daar direkt bij aan
- het onderwerp bevat natuurkundige aspecten, ook al is het vrij te kiezen uit samenleving, techniek of wetenschappelijke natuurkunde
- in elke keuze-periode bij een thema staat één bepaalde vaardigheid centraal
- er vindt een beoordeling plaats van de prestaties van de leerlingen
- er is geen "harde" uitwisseling van de onderwerpen die onderzocht zijn, dat wil zeggen dat de leerlingen inhoudelijk van elkaars onderwerpen niet *hoeven* te leren.

Voorlopig gelden deze punten voor de 4e klas HAVO, de 5e klas keuze-activiteiten zijn qua vorm en doelen nog volop in discussie.

De keuze-periode bij het thema Muziek is de tweede "vrije"-keuze voor leerlingen in 4 HAVO. Bij "Weersveranderingen" stond de vaardigheid *omgaan met informatie* centraal. In deze keuze-periode gaat het om de vaardigheid *schriftelijk rapporteren*. De bedoeling is dat leerlingen

zelfstandig een onderzoekje uitvoeren en hierover een verslag schrijven.

Didaktische aanwijzingen

- Wanneer leerlingen niet zelf op een idee komen over het te verrichten onderzoekje zou de suggestie kunnen worden gegeven het themaboek nog eens door te lopen op activiteiten die in de lessen niet aan bod zijn geweest of op activiteiten waar dieper op kan worden ingegaan. De hoofdstukken 2 t/m 5 bieden vele mogelijkheden daartoe.
- Let er op dat leerlingen een niet te groot onderwerp uitkiezen. Wij denken aan een onderzoekje dat in circa 2 lessen te doen moet zijn.
- Een lessenplan zou er als volgt uit kunnen zien:
 - 1e les
 - Bespreken van de bedoeling van de keuzeperiode.
 - Aanwijzingen voor een verslag bespreken
 - Leerlingen een opzet van een onderzoekje laten maken: werkvraag, benodigdheden, tijdsplanning, taakverdeling.
 - 2e/3e les
 - Uitvoeren van het onderzoekje. Met elk groepje de voortgang bespreken.
 - 4e les
 - Klassikaal problemen bij de onderzoekjes bespreken en tot criteria voor beoordeling komen.
 - Leerlingen beginnen aan het verslag en maken het thuis af.
- Let bij de beoordeling vooral op de kwaliteit van het verslag. Mogelijke criteria:
 - overzichtelijkheid van indeling
 - leesbaarheid
 - informatieve waarde
 - volledigheid
 - korrekte bronvermelding
 - originaliteit

LITERATUUR

1. Algemene Muziekleer, Theo Willemze, Aulaboek 644, Spectrum, Utrecht/Antwerpen, 1982, 532 p., ca. f 20,-

Dit Aula-Compendium bevat zeer veel systematisch geordende informatie. Voor het thema muziek is met name hoofdstuk 9 over Muziekinstrumenten bruikbaar. Ook over het onderwerp 'luisteren naar muziek' is veel nuttigs te vinden. Verder is het boekje handig als naslagwerk wanneer Uw muziekgeschoolde leerlingen met vaktermen beginnen te smijten. Het is geen leesboek, meer een kleine muziek-encyclopedie.

2. The Physics of Music, Scientific American, Freeman, San Francisco, 1978, 98 p.

Dit boekje bundelt 8 artikelen die tussen 1948 en 1977 gepubliceerd zijn in het tijdschrift Scientific American. Het bevat een algemeen artikel over natuurkunde en muziek en de overige artikelen gaan meer in detail in op piano, hout- en koper blaasinstrumenten, de viool, de stem en akoestiek. Sinds deze publikatie zijn nog enkele andere artikelen in Scientific American verschenen over aspecten van de natuurkunde en muziek, bijv.:

The Physics of Organ Pipes, N.H. Fletcher and S. Thwaites, Scientific American, Jan. 1983, p. 84-93.

3. Introduction to the Physics and Psychophysics of Music, J.G. Roederer, Springer-Verlag, New York, 1979, 202 p.

Voor leraren zeer interessant als achtergrondliteratuur. Wij hebben veel uit dit boek gehaald over de perceptie van muziek.

4. Fundamentals of Musical Acoustics, A.H. Benade, Oxford University Press, New York, 1976.

Acoustics betekent in het Engels geluidsleer en dit boek gaat vooral over muziekinstrumenten. Voor liefhebbers die niet genoeg hebben aan Benade's artikelen in Scientific American.

5. Sounds of Music, Ch. Taylor, BBC, London, 1976, 183 p. £ 6.50

Weerslag van reeks lezingen van fysicus Taylor. Rijk geïllustreerd met foto's en diagrammen. Behandelt vooral muziekinstrumenten, maar besteedt ook aandacht aan luisteren en akoestiek.

SAMENVATTING THEMA MUZIEK

1. Oriëntatie

Bij het luisteren naar muziek is het van belang dat de muziek die de luisteraar bereikt zo min mogelijk afwijkt van de door de muzikant(en) gewenste muziek. In dit thema gaat het over de invloeden die de muziek ondergaat op zijn weg van *bron* via *medium* naar *ontvanger*.

Bij deze fysische benadering van muziek spelen enkele grondbegrippen een belangrijke rol: *toonhoogte*, *frequentie* f , *trillingstijd* T , *geluidsniveau*, *amplitude*, *geluidssnelheid* v , *resonantie* en *eigenfrequentie*. Apparaten die bij het meten van deze begrippen gebruikt worden zijn de *oscilloscoop*, de *toongenerator* en de *geluidsniveau-meter*.

2. Muziekinstrumenten

Doorgaans worden muziekinstrumenten in 4 soorten verdeeld. Twee hiervan: snaar- en blaasinstrumenten krijgen in dit hoofdstuk met name aandacht. Voor het begrijpen van de werking van deze instrumenten is het van belang te weten wat *staande golven* zijn: hoe ze ontstaan, wat *buiken*, *knopen* en *golflengte* λ betekenen en hoe deze golflengte samenhangt met frequentie en *golfsnelheid* (in formule $v = f \cdot \lambda$)

Bij een muzikale toon spelen grondtoon en boventonen een rol. De grondtoon hangt bij een snaarinstrument af van de *lengte*, de *spankracht* en de *massa per lengte-eenheid* van de snaar. Grond- en boventonen verhouden zich als 1 : 2 : 3 etc.

Voor blaasinstrumenten is de lengte van de luchtkolom van belang terwijl voor de hoogte van grond- en boventonen een rol speelt of de luchtkolom aan één of aan beide zijde(n) open is. In het eerste geval verhouden grond- en boventonen zich als 1 : 3 : 5 etc., om het tweede geval als 1 : 2 : 3 etc.

Verschillen tussen instrumenten hebben vooral te maken met de *klankkleur*: het aantal en de relatieve sterkte van grond- en boventonen in een muzikale toon. Analyse van de klankkleur is mogelijk met behulp van een *bandfilter*. Zo'n *frequentieanalyse* wordt meestal in een staafdiagram uitgedrukt.

Andere verschillen tussen muziekinstrumenten kunnen zijn het *frequentiebereik*, de *dynamiek*, de *werking*, de *kwaliteit* en de methode van *stemmen*.

3. Luisteren naar muziek

Het oor is een ingewikkelde en ingenieuze ontvanger. Het bestaat uit diverse vliezen, beentjes en orgaantjes die het mogelijk maken minieme luchtdrukvariaties waar te nemen. Daarbij is het oor in staat onderscheid te maken in toonhoogte en geluidsniveau. Dit geluidsniveau L_I wordt in de natuurkunde meestal uitgedrukt in decibel (dB) en berekend met de formule

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad \text{met} \quad I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad \text{en} \quad I = \text{geluidsintensiteit (in feite vermogen/m}^2\text{)}.$$

Tonen worden in het oor geanalyseerd door het *basilair membraan* dat op elke plaats resoneert met een andere frequentie.

De eigenschappen van het gehoor spelen een belangrijke rol bij het luisteren naar muziek. Met behulp van een bandje is het mogelijk inzicht te krijgen in eigenschappen zoals de *gehoorgrenzen*, beleving van *luidheid*,

BIJLAGE D1

gehoordrempelwaarden, het horen van *verschil-tonen*, het waarderen van *akkoorden*, het horen van *maskering* en de *beoordeling* van een muziekstuk. Van grote invloed op het horen is het al dan niet aanwezig zijn van *gehoorstoornissen*. Deze kunnen worden vastgesteld door een *audiogram* te maken. Gehoorstoornissen worden ten dele veroorzaakt door overmatige blootstelling aan lawaai. Met een *hoortoestel* kunnen deze stoornissen worden verlicht.

4. Akoestiek

Op de weg van bron naar ontvanger kunnen geluidssignalen worden vervormd door de eigenschappen van de ruimte waarin bron en ontvanger zich bevinden. Twee belangrijke eigenschappen zijn in dit verband de *nagalm-tijd* en de *frequentie-karakteristiek* van de ruimte. Voor een goed begrip van deze eigenschappen is het nodig meer te weten van de voortplanting van geluid d.m.v. *verdunningen* en *verdichtingen* waarbij de golflengte weer afhangt van frequentie en geluidssnelheid; maar ook over de relatie tussen de afname van het geluidsniveau en de afstand tot de bron en over de geluidsabsorptie die afhangt van de eigenschappen van een materiaal. Deze absorptie wordt uitgedrukt in de *geluidsabsorptie-coëfficiënt* α met $0 < \alpha < 1$. De totale absorptie S in een ruimte wordt gevonden door de absorptie van de afzonderlijke materialen bij elkaar op te tellen: $S = S_1 + S_2 + S_3 + \dots = \alpha_1 A_1 + \alpha_2 A_2 + \alpha_3 A_3 + \dots$ met A_i = het materiaaloppervlak.

- Een maat voor de hoeveelheid nagalm is de *nagalm-tijd* T_{60} . Deze nagalm-tijd kan worden berekend met de formule

$$T_{60} = \frac{1}{6} \frac{V}{S}, \quad \text{waarbij } V \text{ het volume van de ruimte is.}$$

- De frequentie-karakteristiek van een ruimte wordt bepaald door de resonantiefrequenties. Deze hangen af van de afmetingen van de ruimte. Vooral op de weergave van lage tonen hebben de afmetingen grote invloed. In het ideale geval is een frequentie-karakteristiek een rechte lijn. Diverse maatregelen zijn mogelijk om de nagalm-tijd en de frequentie-karakteristiek te beïnvloeden.

5. Weergeven van muziek

Muzikale informatie kan worden *vastgelegd*, *versterkt* en weergegeven via *luidsprekers*. Voor het *vastleggen* zijn er diverse mogelijkheden zoals de grammofoonplaat, de cassetteband en de compact-disk. Bij elk van deze mogelijkheden spelen een rol de *frequentie-karakteristiek*, de *dynamiek* en variaties in *omwentelingssnelheid* bij het afspelen (met als gevolg flutter of wow).

Bij *versterkers* is het van belang te letten op *signaal-ruisverhouding*, *frequentie-karakteristiek* en *vervorming*.

De kwaliteit van een *luidspreker(box)* wordt ook bepaald door de *frequentie-karakteristiek*. Verder moet rekening worden gehouden met de *plaatsing* van de boxen en met de *impedantie*.

Genoemde grootheden spelen een grote rol bij het samenstellen van een complete geluidsinstallatie.

MUZIEK IN HET EPEP

b. Onderwerpen

	ongewijzigd	gewijzigde interpretatie	vervallen	nieuw
- bron-medium-ontvanger als systeem van geluidsoverdracht.				x
BRON:				
- periodieke beweging; trillingstijd (periode); frequentie; amplitude.		x ¹⁾		
- Harmonische beweging (lineaire trilling); uitwijking als functie van de tijd.		x ¹⁾		
- trillingspatronen van eenvoudige samengesteld geluidstrillingen; klankkleur				x
- snelheid en versnelling (kwalitatief), kracht als functie van de uitwijking; fase, gereduceerde fase, faseverschil.		x ⁹⁾		
- grondtoon en boventonen in snaren en luchtkolommen (kwantitatief).		x ³⁾		
- effect van snaarspanning en massa op toonhoogte (kwalitatief).				x
- Eigen trillingen en gedwongen trillingen; resonantie (kwalitatief).		x ¹⁾⁴⁾		
MEDIUM:				
- Geluid als longitudinaal golfverschijnsel.	x			
- Uitbreiding van een transversale stoot langs een koord.			x	
- Experimentele benadering van een harmonisch lopende transversale golf in koord en golfbak; golflengte, golfsnelheid.	x			
- Verband tussen golfsnelheid, frequentie en golflengte.	x			
- Terugkaatsing en interferentie van transversale golven (bepaling van de grootte van de uitwijking grafisch; geen berekening van snelheid en versnelling).		x ²⁾		
- Staande transversale golven in een koord; eigen trillingen.		x ³⁾		
- Beginsel van Huygens; golfvront; golfnormaal; buiging (kwalitatief); breking (kwalitatief).		x ⁶⁾		
- Geluidssnelheid, afhankelijk van het materiaal, onafhankelijkheid van frequentie en amplitude.	x			
- Afname geluidssterkte met de afstand (kwantitatief), kwadraten wet.				x
- Absorptie van geluidsgolven; transmissie; reflectie.				x ⁶⁾
- nagalmtijd; echo; relevante factoren voor (zaal)kwaliteit.				x ⁶⁾⁷⁾
ONTVANGER:				
- Frequentie en toonhoogte; amplitude en geluidssterkte (kwalitatief).		x ⁵⁾		
- Geluidssterkte en luidheid.				x ⁵⁾
- Dopplereffect (kwalitatief).			x	
- Frequentie karakteristiek; versterking en vervorming; signaal/ruis verhouding.				x ⁸⁾
- gevoeligheid van het oor.				x
- verschiltoon; zweving.				x

BIJLAGE D2

c. Doelichting.

- 1) Beperkt tot geluidsvoortbrengende bronnen en geluidstrillingen en alleen grafisch.
- 2) Alleen interferentie als akoestisch verschijnsel.
- 3) Trillingen in snaren en luchtkolommen bekeken als eigen trillingen, niet als interferentie van lopende golven.
- 4) Resonantie ook van klankkasten.
- 5) Verschil fysische en fysiologische begrippen; geluidssterkte kwantitatief.
- 6) In het kader van akoestiek.
- 7) Inclusief meting en berekening van $T_{60} = 1/6 \frac{V}{A}$
- 8) In verband met weergave van muziek.
- 9) Kracht als functie van de uitwijking; faseverschil alleen 0 of $\frac{1}{2}$; geen beschouwingen over snelheid en versnelling bij trillingen.

PERSOONLIJKE GEHOOR BESCHRIJVING

Naam: _____ Datum: _____

1. GEHOORGRENZEN

benedengrens: _____ bovengrens: _____

2. LUIDHEID

omcirkel bij elke frequentie het geluidsniveau, dat door jou als even hard wordt gehoord als de toon van 1000 Hz.

frequentie (Hz)	geluidsniveau (in dB) bij gelijke luidheid											
1000	70											
4000	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	
8000	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	
100	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	
500	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	

3. GEHOORDREMPEL

frequentie (Hz)	vergelijkings- geluidsniveau (dB)		geluidsniveau gehoordrempel (dB)	
100	op 20 cm		op 20 cm	
	bij oor		bij oor	
10000	op 20 cm		op 20 cm	
	bij oor		bij oor	

4. ZWEVINGEN

zwevingen hoorbaar? ☐ ja ☐ nee

6. VERSCHILTONE

(i) $f_1 = 3500$ Hz $3500 \text{ Hz} \leq f_2 \leq 4500$ Hz

verschiltoon hoorbaar? ☐ ja ☐ nee

hoogte frequentie verschiltoon bij $f_2 = 4000$ Hz: _____

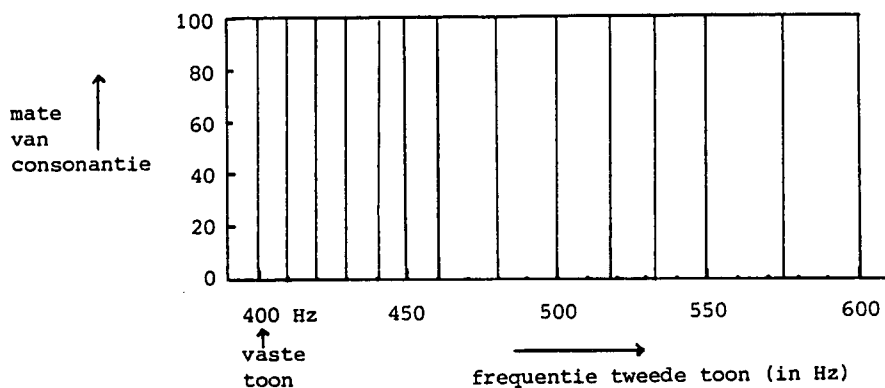
(ii) $f_1 = 1000$ Hz $1000 \text{ Hz} \leq f_2 \leq 1200$ Hz

verschiltoon hoorbaar? ☐ ja ☐ nee

hoogte frequentie verschiltoon bij $f_2 = 1150$ Hz: _____

BIJLAGE D3

7. CONSONANT/DISSONANT



8. MASKERING

f maskerende toon (Hz)	f gemaskeerde toon (Hz)	maskering
400 Hz, hard	1600 Hz, zacht	ja/nee
	200 Hz, zacht	ja/nee
2400 Hz, hard	1600 Hz, zacht	ja/nee
	200 Hz, zacht	ja/nee

10. BEOORDELING VAN MUZIEK

	1	2	3	4	5	6	
langzaam							snel
kaal							kleurrijk
zwaar							licht
sterk							zwak
eenvoudig							ingewikkeld
levendig							moe
koel							gevoelig

Zet op elke rij een blauwe stip voor jouw beoordeling van het eerste fragment (Louis Armstrong, New Orleans Function), een zwarte stip voor het tweede fragment (Mendelssohn, symf. no 4) en een rode stip voor het derde fragment (Wayne Country, Show the gate of heaven).

TOELICHTING BIJ DE TESTPLAAT VAN "HET HOREN VAN TWEE MELODIEËN"

TEMPORAL COHERENCE IN THE PERCEPTION OF TONE SEQUENCES

by Leon van Noorden
Institute for Perception Research
Eindhoven, Insulindelaan 2, The Netherlands.

6804 014

Introduction

As is clear from common experience in listening to melodies, sequences of tones can form coherent wholes in the perception. There are, however, tone sequences in which the successive tones are not perceived as coherent. This phenomenon we call fission. Since fission is not a generally known effect, examples of it and its counterpart temporal coherence are presented on this record.

As will appear, there are numerous possible ways of composing tone sequences that are not perceived as coherent. Fission can be observed in tone sequences in which the successive tones differ too much in frequency, spectrum, amplitude and so on. But a characteristic of these phenomena is that the occurrence of a certain percept does not depend only on these objective features of the tone sequence. There are large intermediate ranges of the objective features of the tone sequence in which the observer himself can influence his percepts. It follows that it is sometimes difficult to make the demonstrations unambiguous. The listener is therefore encouraged to listen in as many ways as he can.

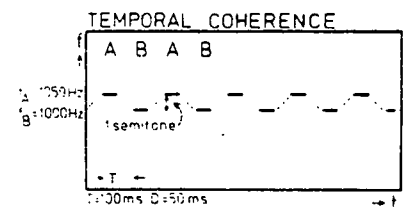
The successive parts of this record are intended to illustrate various aspects of temporal coherence and fission and do not form a logical whole. They generally run parallel to the chapters of the thesis "Temporal Coherence in the Perception of Tone Sequences".

In an alternating tone sequence of ten tones per second with tone intervals of 1 semitone, the tones form a coherent whole.

test a

ex 1.1

This was an example of temporal coherence

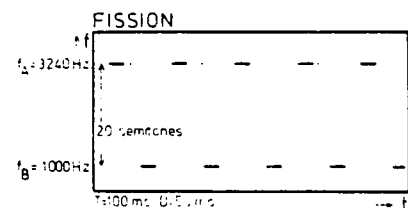


In an alternating tone sequence of ten tones per second with tone intervals of e.g. 20 semitones, it is more difficult to perceive the sequence as a coherent whole. On the other hand, you can direct your attention to the string of high tones; the low tones then form a kind of background. You can also direct your attention to the string of low tones.

test b

ex 1.2

This was an example of fission.

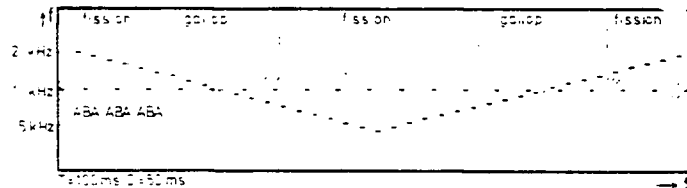


BIJLAGE D⁴

test c

Temporal coherence and fission will now be demonstrated in the tone sequence ABA ABA. The tempo of the tones B in this sequence is half that of the tones A. The pitch of the tones B is fixed, while that of the tones A starts about an octave above B, gradually moves down to about an octave below B and then moves up again. The string of tones A thus crosses the string B twice. The temporal coherence near the cross-over points, gives rise to the characteristic "gallop" rhythm. At larger tone intervals, fission can be heard: you can direct your attention to the tones B, with their low tempo, and to the tones A, with their high tempo.

ex 2.1



test d

We now present two interleaved tunes forming a tone sequence of ten tones per second. In the beginning you will not recognize the tunes, since they cross each other several times. At each repetition we raise the pitch of every other tone by two semitones, so that finally fission enables you to recognize the two tunes.

ex 7.2 (after Dowling)

(In the figure the notes of the melodies can be recognized by the direction of their tails.)



test e

II. Next will be illustrated the analysing faculty of our hearing organ. The periodic impulse is repeated. In order to focus attention to the 5th harmonic (1000 c/s), this component will be taken away and reintroduced in the rhythm — . . . — Then the same is done with the 3rd harmonic (600 c/s), the 2nd harmonic (400 c/s) and finally with the fundamental (200 c/s). The elimination of the fundamental does not alter the pitch but clearly changes the timbre. This artifice may be helpful in exploiting the analysing faculty of our hearing organ. Normally, however, one does not listen analytically but one rather perceives such a complex sound as a whole, having one pitch.

BESCHRIJVING GELUIDSBAND

Bij het PLON is een cassettebandje verkrijgbaar met aan de ene zijde (kant A) o.a. het audio-gedeelte van twee band-diaseries over akoestiek (bij hoofdstuk 4) en aan de andere zijde (kant B) tonen van muziekinstrumenten (hoofdstuk 2) en enkele geluiden die horen bij de Persoonlijke Gehoorbeschrijving (PGB, hoofdstuk 3).

Kant A

De band - diaserie bestaat uit twee onderdelen:

- nagalm (hoort bij inleiding hoofdstuk 4, activiteit 1)
tijdsduur: + 4.5 minuten (a)
- frequentiekaracteristiek (hoort bij inleiding hoofdstuk 4, activiteit 2)
tijdsduur: + 2.5 minuten (b)

Op dezelfde kant van de band staat ook de opname voor par. 4.4, activiteit 1: de ideale nagalmtijd voor muziek (c).

Op de band staan 1000 Hz stuurpulsen voor een diastuurapparaat.

a. Nagalm

Voor deze band-diaserie zijn opnamen gemaakt in vier ruimten: 2 verschillende huiskamers, de Jacobikerkerk en het Muziekcentrum Vredenburg. Deze ruimten verschillen wat betreft hun akoestische eigenschappen. We kunnen de ruimten in het volgende schema passen.

	klein volume	groot volume
weinig absorberend materiaal aanwezig	huiskamer 1	kerk
veel absorberend materiaal aanwezig	huiskamer 2	muziekcentrum

Rangschikken we deze ruimten naar oplopende nagalmtijd, dan krijgen we: huiskamer 2, huiskamer 1, muziekcentrum, kerk. Hetgeen in overeenstemming is met de formule van Sabine:

$$T_{60} = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{S}$$

b. Frequentiekaracteristiek

Dit gedeelte van de band - diaserie is slechts bedoeld om de leerlingen te oriënteren op het feit dat ruimten kunnen verschillen qua frequentiekaracteristiek. De opnamen zijn gemaakt in huiskamer 1 en huiskamer 2 (zie boven). In huiskamer 2 worden de hoge tonen sterk geabsorbeerd, het geluid wordt doffer.

c. Ideale nagalmtijd

In dezelfde vier ruimten zijn opnamen gemaakt van het nummer "Too tight rag". Dit stukje band kan gebruikt worden voor par. 4.4 activiteit 1: de ideale nagalmtijd voor muziek.

BIJLAGE D5

Samenvatting van het script

Nagalm

	tijd	geluid	beeld
inleiding	+ 30 sec.	tekst: "Nagalm. Deze band-diaserie (...) (...) de mate van nagalm bepalen".	1) titeldia 2) 2 huiskamers 3) kerk + muziekcentrum (interieur)
huiskamer 1 (weinig absorptie)	+ 1 minuut	doorlopende bluesimprovisatie	4) huis 1 van buiten 5) } huiskamer 1 6) } interieur 7) }
huiskamer 2 (veel absorptie)	+ 1 minuut		8) huis 2 van buiten 9) } huiskamer 2 10) } interieur 11) }
kerk	+ 1 minuut		12) kerk van buiten 13) } kerk 14) } interieur 15) }
muziekcentrum	+ 1 minuut		16) muziekcentrum van buiten 17) } muziekcentrum 18) } interieur 19) }
			20) zwarte dia

Frequentiekarakteristiek

	tijd	geluid	beeld
inleiding	+ 30 sec.	tekst: "Frequentie- karakteristiek. Deze band-diaserie (...). (...) van de ruimte".	21) titeldia 22) 2 huiskamers 23) huis 1 + huis 2 van buiten
huiskamer 1 (weinig absorptie)	+ 1 minuut	"You can't get the stuff" ↑ ↓ doorlopend het nummer	24) huis 1 van buiten 25) } huiskamer 1 26) } 27) } interieur
huiskamer 2 (veel absorptie)	+ 1 minuut		28) huis 2 van buiten 29) } huiskamer 2 30) } 31) } interieur
	18 sec.		32) } 33) } aftiteling 34) } 35) zwarte dia

ideale nagalmtijd

	tijd	geluid
huiskamer 1 (weinig absorptie)	+ 1 minuut	"Too tight rag" ↑ ↓ doorlopend het nummer
huiskamer 2 (veel absorptie)	+ 1 minuut	
kerk	+ 1 minuut	
muziekcentrum	+ 1 minuut	

BIJLAGE D5

Kant B

0. Referentietoon 1000 Hz (zie 2).

1. Muziekinstrumenten

Voor het doen van par. 2.4 activiteit 2 (signalen analyseren) hebben we een aantal muziekinstrumenten op de band gezet. Een zelfde toon wordt een minuut lang steeds herhaald. De volgende tonen staan op de band:

	instrument	toon	frequentie (ongeveer) (Hz)
1)	trompet	g'	392
2)	fagot	b	247
3)	fagot	d'	294
4)	trombone	f'	349
5)	cello	a	220
6)	hoorn	bes	233
7)	hoorn	f	349
8)	kerkorgel prestant	d'	294
9)	kerkorgel roerfluit	d'	294
10)	kerkorgel bourdon	d'	294
11)	kerkorgel open fluit	c'	262
12)	elektronisch orgel		
	prestant	d'	294
13)	viool	cis	277

Zeer goed te analyseren zijn no. 2, 3, 6, 7 en 12. No. 5 is erg moeilijk te analyseren.

De analyse kan het best gebeuren met een dubbelstraals-oscilloscoop. Op één kanaal komt het oorspronkelijke signaal, op het andere kanaal komt het gefilterde signaal. Vooral de triggering is moeilijk. Dit kan het beste gebeuren op het oorspronkelijke signaal en met de hand (dus niet automatisch), terwijl je op het scoopscherm controleert wat je aan het doen bent.

Als leerlingen zelf bandopnamen maken, moeten ze letten op achtergrondgeluiden zoals verkeerslawaaï; deze verstoren namelijk de triggering van het signaal.

2. Geluidsband voor hoofdstuk 3

Deze band is gemaakt in samenwerking met het Instituut voor Sonologie.

• *Referentietoon 1000 Hz*

De band begint met een referentietoon van 1000 Hz. Het volume van de versterker moet zodanig worden geregeld dat de referentietoon in de klas een geluidsniveau heeft van 90 dB. Pas er echter voor op dat bij test 2 (luidheid) de boxen niet worden opgeblazen.

• *Het meten van de luidheid van een toon (3.3.2)*

Op de band wordt de toon van 1000 Hz (70 dB) afgewisseld met een andere toon (resp. 4000 Hz, 8000 Hz, 100 Hz en 500 Hz), waarvan het geluidsniveau steeds toeneemt.

Het is moeilijk te horen wanneer de tonen *even hard* klinken. Maar de testjes zijn zo kort, dat ze gemakkelijk één of twee keer herhaald kunnen worden.

Een ander probleem is dat de geluidsinstallatie (bandrecorder en boxen) de tonen niet op het opgenomen geluidsniveau weergeeft. Met name de testjes van 8000 en 100 Hz hebben daar onder te lijden. Dit probleem is, als het zich voordoet, alleen op te lossen door de test met eigen apparatuur (2 toongeneratoren en dB-meter) uit te voeren.

1. luidheid bij 4000 Hz

toon no.	frekwentie (Hz)	geluidsniveau in klas (dB)
1	1000	70
2	4000	60
3	1000	70
4	4000	62
5	1000	70
6	4000	64
:	:	:
20	4000	78
21	1000	70
22	4000	80

(pauze)

2. luidheid bij 8000 Hz

toon no.	frekwentie (Hz)	geluidsniveau in klas (dB)
1	1000	70
2	8000	70
3	1000	70
4	8000	72
5	1000	70
6	8000	74
:	:	:
20	8000	88
21	1000	70
22	8000	90

(pauze)

3. luidheid bij 100 Hz

toon no.	frekwentie (Hz)	geluidsniveau in klas (dB)
1	1000	70
2	100	70
3	1000	70
4	100	72
5	1000	70
6	100	74
:	:	:
20	100	88
21	1000	70
22	100	90

(pauze)

4. luidheid bij 500 Hz

toon no.	frekwentie (Hz)	geluidsniveau in klas (dB)
1	1000	70
2	500	60
3	1000	70
4	500	62
5	1000	70
6	500	64
:	:	:
20	500	78
21	1000	70
22	500	80

(pauze)

BIJLAGE D5

• *Luisteren naar akkoorden (3.3.7)*

Op de band staan samenklanken gevormd door 2 sinustonen.

akkoord no.	sinus 1	sinus 2
1	400	410
2	400	420
3	400	430
4	400	440
5	400	450
6	400	460
7	400	480 (kleine terts)
8	400	500 (grote terts)
9	400	517
10	400	533.3 (kwart)
11	400	550
12	400	575
13	400	600 (kwint)

• *Het effect van maskering horen (3.3.8)*

Voor deze test kan de versterker wat zachter worden gezet. Bijvoorbeeld zo dat de harde toon een geluidsniveau van 80 dB in de klas heeft.

De tonen zijn steeds opgenomen volgens het volgende schema:

				toongenerator 1
				↓
				toongenerator 1 en toongenerator 2 samen
				↓
				toongenerator 1
				↓
	toongenerator 1		toongenerator 2	
test no.	frekwentie (Hz)	in klas (dB)	frekwentie (Hz)	in klas (dB)
1	1600	40	400	80
2	200	50	400	80
3	1600	40	2400	80
4	200	50	2400	80

• *Het horen van twee melodieën (3.3.9)*

5 tests zoals beschreven in het themaboek.

• *Beoordeling van muziek (3.3.10)*

3 fragmenten zoals beschreven in de P.G.B.

• *Referentietoon 1000 Hz*

De band sluit af met een 1000 Hz referentietoon. Deze toon is opgenomen voor kopieerdoeleinden en moet nog net onvervormd op de band staan.

Logaritme en logaritmisch grafiekenpapier.

1) Reken uit, met behulp van je rekenmachine (of uit het hoofd):

a) $10^3 = \dots\dots\dots$ $10^4 = \dots\dots\dots$ $10^{3,7} = \dots\dots\dots$ $10^{1,42} = \dots\dots\dots$

b) $10^{-3} = \dots\dots\dots$ $10^{-4} = \dots\dots\dots$ $10^{-3,7} = \dots\dots\dots$ $10^{-1,42} = \dots\dots\dots$

2) Reken uit, ZONDER rekenmachine:

a) $10^x = 100 \rightarrow x = \dots\dots\dots$ $10^x = 1\,000\,000 \rightarrow x = \dots\dots\dots$

b) $10^x = 0,01 \rightarrow x = \dots\dots\dots$ $10^x = 0,000\,000\,1 \rightarrow x = \dots\dots\dots$

3) Het uitrekenen van de onbekende x in opgave 2) noemen we: het berekenen van de LOGARITME (voor het grondtal tien).

Dus als gevraagd wordt: Bereken x als gegeven is $10^x = 1000$ dan zeggen we:

De LOGARITME van 1000 voor het grondtal 10 is 3; immers $10^3 = 1000$ en dus is de onbekende x gelijk aan 3.

We noteren dat als volgt: ${}^{10}\log 1000 = 3$ want $10^3 = 1000$

Nog een paar voorbeelden:

${}^{10}\log 100 = 2$ want $10^2 = 100$

${}^{10}\log 0,1 = -1$ want $10^{-1} = 0,1$

${}^{10}\log 10 = 1$ want $10^1 = 10$

${}^{10}\log 1 = 0$ want $10^0 = 1$

4) Bereken: ${}^{10}\log 1000 = \dots\dots\dots$ want $\dots\dots\dots$

${}^{10}\log 0,001 = \dots\dots\dots$ want $\dots\dots\dots$

${}^{10}\log (-10) = \dots\dots\dots$ want $\dots\dots\dots$ (let op!)

${}^{10}\log 5012 = \dots\dots\dots$ want $\dots\dots\dots$ (zie opgave 1^a)

5) In de meeste gevallen is het berekenen van de LOGARITME niet uit het hoofd te doen. Vandaar dat we in de bovenbouw over een rekenmachine moeten beschikken. Gebruik deze machine om de volgende logaritmen te berekenen.

Opmerking: Het getal 10 dat 'in de lucht staat' laten we meestal weg, dus we schrijven in het vervolg gewoon $\log 100$ en niet meer ${}^{10}\log 100$.

Bereken: $\log 2 = \dots\dots\dots$ $\log 20 = \dots\dots\dots$ $\log 200 = \dots\dots\dots$ $\log 2000 = \dots\dots\dots$

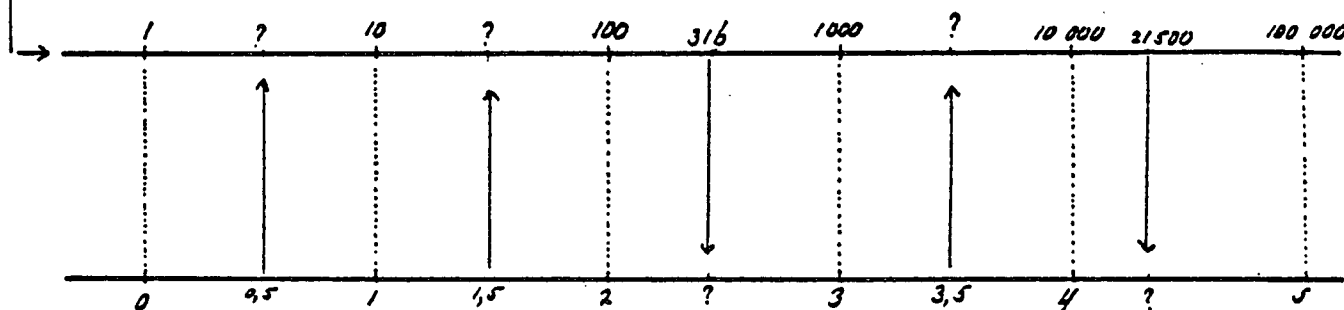
$\log 5,6 = \dots\dots\dots$ $\log 56 = \dots\dots\dots$ $\log 560 = \dots\dots\dots$ $\log 5600 = \dots\dots\dots$

- Ga dat nog eens na aan de volgende rij:

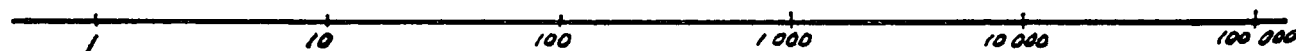
$$\log 3 = \dots \quad \log 30 = \dots \quad \log 300 = \dots \quad \log 3000 = \dots$$

- Op de onderste getallen lijn staan de logaritmen van die getallen uitgezet.

Vul de ontbrekende getallen op BEIDE lijnen in.



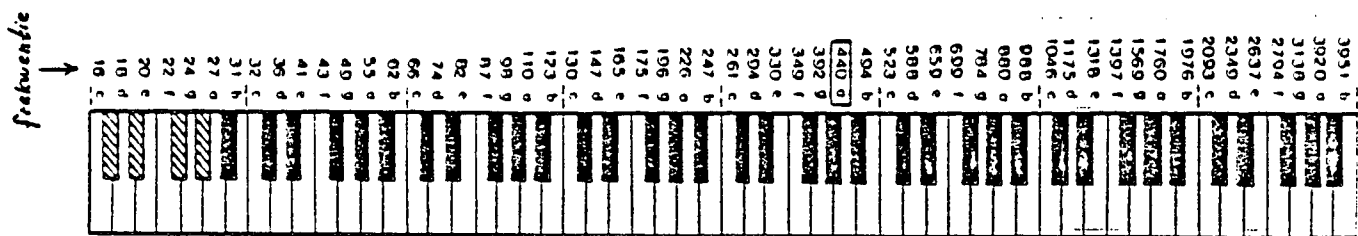
- 8) Kijk nog eens naar de hierbij getekende getallenlijn.



In het thema "MUZIEK" zul je vaak grafieken tegenkomen waar de x-as (en soms ook de y-as) zo zijn ingedeeld.

We spreken dan van een LOGARITMISCHE SCHAAVERDELING.

- 9) Vergelijk de getallenlijn uit opgave 8) eens met het toetsenbord van een piano, zoals dat staat afgebeeld op bladzijde 28 van het themaboek.



Wat voor 'schaalverdeling' is een toetsenbord dus?

Antwoord:

- 10) Niet alleen de toonHOOGTEN horen wij op een logaritmische manier, ook de toonSTERKTEN horen we logaritmisch. Hierover wordt in het themaboek in par. 3.2 en 3.3 meer gezegd.

Biofysica: levende natuurkunde / 7

Dr. G. F. Smoorenburg en prof. dr. ir. R. Plomp

Het oor beluisterd

Wanneer we naar muziek, spraak of andere geluiden luisteren, dan realiseren we ons meestal niet dat het gehoororgaan hierbij een essentiële rol vervult. We willen genieten van muziek, we proberen een gesprek te volgen of we willen weten of de baby nog huult. Bij al deze activiteiten wordt de rol van het oor, toch een onvermijdelijke tussenschakel bij de waarneming, nauwelijks in aanmerking genomen. We zijn slechts geïnteresseerd in het geluid zelf. We worden echter direct herinnerd aan de rol van ons gehoororgaan wanneer dit minder goed functioneert. Dan komt duidelijk tot uiting dat onze waarneming begrensd wordt door eigenschappen van ons gehoororgaan. Het gehoor is zeer gevoelig voor vervorming maar het oor produceert zelf ook vervormingscomponenten. Het naastste streven van hifi-apparaatfabrikanten om de vervorming terug te dringen (omdat ze nog steeds hoorbaar is) wordt als water-naar-de-zee-dragen gekarakteriseerd.

In het biofysisch gehooronderzoek trachten wij de eigenschappen van het gehoororgaan vast te leggen. Kennis van deze eigenschappen stelt ons in staat de eisen te formuleren waaraan geluidssignalen moeten voldoen opdat normaalhorenden ze goed zullen kunnen waarnemen. Tevens stelt kennis van deze eigenschappen ons in staat afwijkend functioneren van het gehoororgaan vast te stellen en, in dat geval, maatregelen ter verbetering van de waarneming aan te geven. De biofysische aanpak in het gehooronderzoek kenmerkt zich door het gehoororgaan als meetinstrument te beschouwen. Willen we het functioneren van dit meetinstrument experimenteel onderzoeken, dan staan ons in hoofdzaak twee methoden ter beschikking. Volgens de eerste methode, behorend tot de psychofysica (zie het in deze serie verschenen artikel over psychofysica van Houtgast en Vos), proberen we hetgeen we horen zo exact mogelijk vast te leggen. Met behulp van geschikt gekozen geluidssignalen gaan we na wat wel en wat niet gehoord wordt. Bij dit psychofysisch onderzoek zijn we niet meer geïnteresseerd in het geluid zelf, maar we luisteren naar hetgeen ons oor van het geluid maakt; we beluisteren ons oor. Volgens de tweede methode, behorend tot de fysiologische fysica, trachten we het functioneren van het gehoororgaan als meetinstrument te begrijpen door de onderdelen van dit instrument te bestuderen en niet slechts, zoals in de psychofysica, het meetresultaat. Binnen de fysiologische fysica neemt het elektrofysiologisch onderzoek een belangrijke plaats in. Enerzijds wordt dit onderzoek verricht door elektroden aan te brengen in het gehoororgaan van proefdieren. Anderzijds is het mogelijk, ook bij mensen, in het gehoororgaan opgewekte elektrische activiteit op enige afstand van dit orgaan te registreren. Deze laatste techniek is mede van klinisch belang. In het volgende zullen we met behulp van psychofysisch onderzoek nagaan op welke aspecten van het geluid de toonhoogstwaarneming is gebaseerd. Hierbij stuiten we al gauw op een belangrijke eigenschap van het gehoororgaan, namelijk dat dit orgaan het geluid ontdeelt in frequentiecomponenten. Deze ontleding, ofwel frequentie-analyse, wordt in dit artikel nog nader belicht. In aanvulling op de toonhoogstwaarneming bespreken we vervorming van het geluid in het gehoororgaan waarna we zullen laten zien hoe vervorming en frequentie-analyse bij elektrofysiologisch onderzoek kan worden teruggevonden.

De rol van de grondtoon bij de toonhoogstwaarneming

Luisteren we naar een toon voortgebracht door bijvoorbeeld een muziekinstrument, dan heeft deze toon een bepaalde klankkleur (een bepaald timbre) en een bepaalde toonhoogte. De klankkleur is voor ieder instrument verschillend terwijl verschillende instrumenten dezelfde toonhoogte kunnen voortbrengen. Evenzo kunnen we stellen dat de verschillende klankkleuren verschillende klankkleuren hebben (de ene klinkt donker, de andere scherp) terwijl verschillende klankkleuren op dezelfde toonhoogte kunnen worden gezongen. De klankkleur wordt bepaald door de onderlinge sterkte van de frequentiecomponenten van het geluid. De toonhoogte, daarentegen, wordt bepaald door de frequenties van de componenten.

Wanneer we nu alle harmonischen uit het geluid verwijderen zodat alleen de grond-

component overblijft (een extreme vorm van het terugdraaien van de hoge-tonenregelaar van uw radio) dan verandert de klankkleur (het geluid wordt dof) terwijl de toonhoogte ongewijzigd blijft. Kennelijk is de toonhoogte van de grondcomponent gelijk aan die van het geluid waarin alle harmonischen aanwezig zijn. Met deze wetenschap kan men zich afvragen of die grondcomponent dan ook altijd bepalend is voor de toonhoogte van geluid dat uit vele harmonischen bestaat. Deze vraag speelde ruim een eeuw een belangrijke rol in de hoortheorie.

Het begon in 1843 met een publikatie van Ohm (bekend van de wet uit de elektriciteitsleer). Ohm probeerde enige door Seebeck met een akoestische sirene (zie fig. 1) uitgevoerde experimenten te verklaren op basis van zijn sedertdien voor de hoortheorie belangrijke stelling dat in iedere toon een aantal deeltonen zijn te onderscheiden met verschillende toonhoogten die corresponderen met de harmonischen van het geluid, zie

Frequentie-analyse

Een belangrijke eigenschap van het gehoororgaan is dat dit orgaan het geluid ontdeelt in frequentiecomponenten. Dit wil zeggen dat een geluidstrilling door dit orgaan wordt opgesplitst in een aantal sinusvormige trillingen met verschillende frequenties. In bijgaande figuur wordt dit geïllustreerd. Bovenaan zien we twee periodes van een periodieke trilling en daaronder de sinusvormige componenten die, bij elkaar opgeteld, precies de golfvorm opleveren van de periodieke trilling. De sinusvormige componenten heten frequentiecomponenten, het opsplitsen van een trilling in frequentiecomponenten noemt men frequentie-analyse. De laagste frequentiecomponent, de component met een periodeduur die overeenkomt met de periodeduur van de periodieke trilling, wordt de grondcomponent genoemd, de hogere componenten met frequenties van $2\times$, $3\times$, $4\times$, enz. de grondfrequentie worden aangeduid als de harmonischen. In de fysica is het gebruikelijk de grondcomponent als eerste harmonische te betitelen en zo verder te tellen zodat de n° harmonische een frequentie van n -maal de grondfrequentie heeft. Frequentie-analyse door het gehoororgaan houdt in dat de verschillende frequentiecomponenten van het geluid in verschillende cellen van de gehoorzenuw terecht komen.

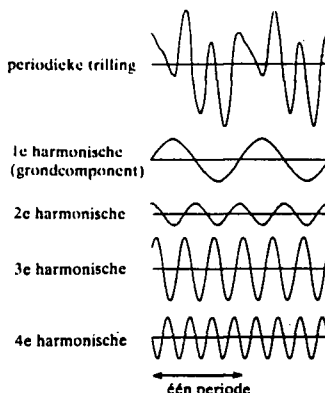


fig. 2. (Het kunnen onderscheiden van deze deeltonen vereist wel enige oefening.) Ohm verklaarde de overeenkomst tussen de toonhoogte van een geluid dat uit vele harmonischen bestaat en de toonhoogte van de grondcomponent uitsluitend uit de aanwezigheid van die grondcomponent.

Seebeck, daarentegen, vond deze oplossing niet erg heftig omdat geluiden die zo werden geproduceerd dat de grondcomponent als vrijwel afwezig mocht worden beschouwd, toch een toonhoogte correspondeerde met deze grondcomponent bleken te hebben. (Tegenwoordig kunnen we dit eenvoudig verifiëren door bij de radio de lage tonen weg te draaien.) Seebeck concludeerde daarom dat niet de grondcomponent maar de periodicititeit in de golfvorm van het geluid de toonhoogte bepaalt. De golfvorm vertoont namelijk, wanneer de grondcomponent niet in het geluid aanwezig is, toch een periodicititeit die overeenkomt met de frequentie van de grondcomponent. Vooral nadat de grote natuuronderzoeker Hermann von Helmholtz in zijn in 1863 gepubliceerde werk 'Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik' voor Ohm koos, raakte de alternatieve verklaring van Seebeck meer en meer op de achtergrond. Von Helmholtz stelde dat ook al zou de grondcomponent in het geluid afwezig zijn, dan nog zou deze component door vervorming in het gehoororgaan weer kunnen worden opgewekt.

Het vraagstuk kwam opnieuw in de belangstelling te staan door experimenten die Schouten rond 1938 in ons land uitvoerde. Hij was in staat de sterkte van de grondcomponent te regelen met een speciaal daarvoor geconstrueerde toongenerator. Het bleek hem dat tonen waarin de grondcomponent beslist niet meer hoorbaar was dezelfde toonhoogte hadden als tonen waarin deze component wel hoorbaar was. Daarom koos Schouten voor de opvatting van Seebeck. De hogere harmonischen duidde hij aan met de term 'het residu'. Het idee dat de periodicititeit van dit residu bepalend is voor de waargenomen toonhoogte raakte daardoor bekend als de residu-theorie.

Na de Tweede Wereldoorlog kwam het vraagstuk pas goed in discussie. In eigen land bestreed Hoogland, een pupil van de Utrechtse hoogleraar Groen, in 1953 de residu-theorie. In zijn dissertatie trachtte hij aan te tonen dat de door Schouten waargenomen toonhoogte toch een gevolg moest zijn geweest van het opnieuw ontstaan van de grondtoon door vervorming in het gehoororgaan zelf. In de Verenigde Staten raakte Licklider (een toentertijd bekende onderzoeker van de auditieve perceptie) geïnteresseerd in het vraagstuk. In 1955 kwam hij naar ons land met een bandopname waarmee hij in het laboratorium van Groen in het Academisch Ziekenhuis te Utrecht demonstreerde dat Hooglands redenering onhoudbaar was. De bandopname bevatte een melodie opgebouwd uit tonen zonder grondcomponent. Door toevoeging van een ruisband rond de frequentie van de grondcomponent zorgde Licklider ervoor dat een eventueel weer door vervorming in het oor opgewekte grondtoon gemaskeerd zou worden. De afwezigheid van de grondcomponent en het toevoegen van de ruis bleken geen effect te hebben op de waargenomen melodie.

De onhoudbaarheid van Hooglands redenering bleek ook uit experimenten die terzelfder tijd in Nederland werden verricht. De Boer

Het oor beluisterd

liet in zijn dissertatie van 1956 zien dat de toonhoogte van het residu verandert wanneer de frequenties van een groep hogere harmonischen die het residu vormen, worden verschoven van bijvoorbeeld 1000, 1200, 1400, 1600 en 1800 Hz naar 1030, 1230, 1430, 1630 en 1830 Hz. Door vervorming zou een verschiltoon kunnen worden opgewekt die echter door de frequentieverschuiving van 30 Hz niet wordt beïnvloed; het frequentieverschil tussen de opeenvolgende frequentiecomponenten, bijvoorbeeld $f_1=1000$ Hz, $f_2=1200$ Hz, $f_3-f_1=200$ Hz, is na de verschuiving immers 200 Hz gebleven. Al zou deze verschiltoon dus, mogelijk zelfs op een onhoorbare wijze, door vervorming in het gehoororgaan de plaats van de grondcomponent hebben ingenomen, dan nog kan deze verschiltoon de toonhoogte niet bepaald hebben omdat de toonhoogte wel met de frequentieverschuiving veranderde. Nader onderzoek heeft geleerd dat ook andere vervormingscomponenten van meer gecompliceerde aard niet ten grondslag kunnen liggen aan de toonhoogte waarneming. Op verschillende wijzen was nu dus aangetoond dat de waargenomen toonhoogte niet afhankelijk is van de aanwezigheid van de grondcomponent in het geluid. Hierbij dienen we nog wel even de aantekening te maken dat we ons bepalen tot het normale toonhoogtegebied voor spraak en muziek. We spreken niet over extreem hoge registers waar de harmonischen al gauw boven het audiogebied komen te liggen.

De derde, vierde en vijfde harmonische zijn toonaangevend

Nadat was gebleken dat de grondcomponent niet belangrijk is voor de toonhoogte waarneming werd de vraag hierna: heeft Seebeck dan toch gelijk? *Is de periodiciteit van de golfvorm inderdaad bepalend voor de toonhoogte waarneming?* De periodiciteit wordt zichtbaar in de golfvorm wanneer een aantal harmonischen wordt samengevoegd. Hoe is dit te rijmen met Ohms bevinding dat het gehoororgaan een toon juist ontleedt in een aantal deeltonen die corresponderen met de frequentiecomponenten van het geluid? Het antwoord werd door Schouten gezocht in de begrensdheid van dit ontledingsvermogen: we kunnen slechts deeltonen horen die corresponderen met de lagere harmonischen, de daarboven gelegen harmonischen zouden samen de periodiciteit kunnen doorgeven.

In 1964 liet Plomp zien waar de grenzen van het ontledingsvermogen (de frequentie-analyse) van het gehoororgaan liggen. Hij liet naast een toon die uit vele harmonischen bestond (een complexe toon) twee enkelvoudige tonen horen waarvan er één gelijk was aan één van de harmonischen van de complexe toon en de andere aan één frequentiecomponent die tussen deze harmonische en de naastliggende harmonische in lag. Door nu te vragen welke van de twee enkelvoudige tonen als deeltoon in de complexe toon voorkwam, werd het duidelijk wanneer de deeltoon gehoord werd en wanneer de proefpersoon ging gokken. Bij dit experiment bestond de mogelijkheid dat een muzikale proefpersoon die niet één van de twee enkelvoudige tonen zou kunnen terugvinden in de complexe toon, af zou gaan op de toonhoogte-intervallen tussen de enkelvoudige tonen en de complexe toon. Zo zou de enkelvoudige toon die op acht maal de grondfrequentie ligt goed kunnen worden geïdentificeerd tegenover die op 7,5 of 8,5 maal de grondfrequentie omdat de eerste drie octaven boven de

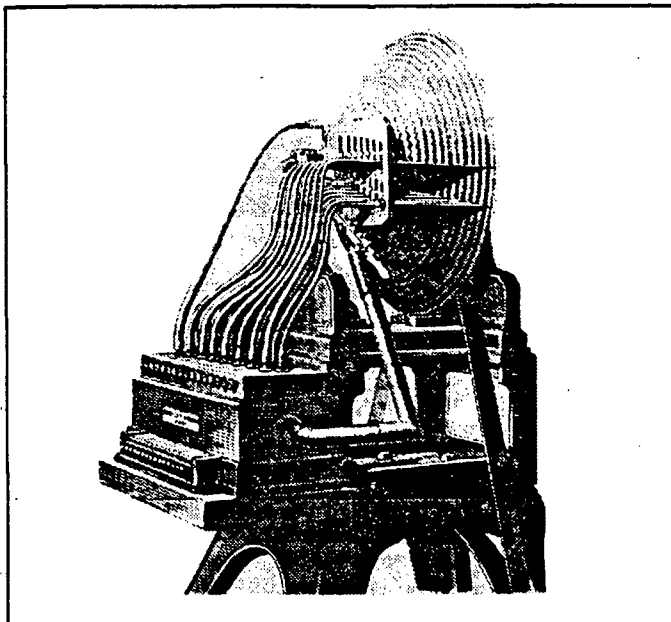


Fig. 1. Een akoestische sirene zoals die rond 1880 door Rudolph König werd gebruikt voor onderzoek op het gebied van de toonperceptie. De akoestische sirene werd later vervangen door verschillende soorten elektro-mechanische toongeneratoren zoals de toonwielen van het Hammond-orgel. Tegenwoordig worden de geluidsignalen met een computer punt voor punt berekend. De berekende waarden worden vervolgens snel achter elkaar omgezet in elektrische spanningen die naar een hoofdtelefoon of luidspreker worden gevoerd.

toonhoogte van de complexe toon ligt en niet omdat de eerste als deeltoon in de complexe toon werd gehoord. Daarom werd het experiment door Plomp herhaald met een complexe toon waarbij de frequentiecomponenten geen harmonische ligging hadden (geen eenvoudige verhoudingen van de frequenties). Het resultaat van dit experiment was voor de harmonische en de ontstemde geluiden gelijk: proefpersonen kunnen gemiddeld de eerste vijf harmonischen afzonderlijk waarnemen. De toonhoogte zou dus volgens Schouten gebaseerd moeten zijn op harmonischen boven de vijfde.

De laatste stap in deze ontwikkeling vormde onderzoek direct gericht op de vraag welke harmonischen nu eigenlijk de toonhoogte bepalen. Plomp (1966) werkzaam in het Instituut voor Zintuigfysiologie TNO te Soesterberg en Ritsma (1967) werkzaam in het door Schouten in 1955 opgerichte Instituut voor Perceptie-Onderzoek te Eindhoven haalden hiervoor de reeds door De Boer toegepaste truc van het verschuiven der frequentiecomponenten weer uit de doos. De harmonischen werden nu echter niet meer allemaal dezelfde kant op verschoven zoals De Boer het deed, maar een deel van de harmonischen werd naar iets hogere frequenties verschoven terwijl het andere gedeelte naar iets lagere frequenties werd verschoven. Aan proefpersonen werd gevraagd of de toonhoogte steeg dan wel daalde. Het resultaat was zeer verrassend. Bij een typische waarde voor de grondfrequentie van 200 Hz bleken de derde, vierde en vijfde harmonische, (harmonischen die afzonderlijk kunnen worden waargenomen), de toonhoogte te bepalen; Schouten kreeg met zijn idee, dat de toonhoogte gebaseerd zou moeten zijn op hogere harmonischen die niet door het gehoororgaan worden gescheiden maar samen

de periodiciteit kunnen doorgeven, dus geen gelijk.

Men zou als bezwaar tegen de voorgaande experimenten van Plomp en van Ritsma kunnen aanvoeren dat de resultaten zijn verkregen met niet-harmonische signalen die niet representatief zijn voor tonen die op natuurlijke wijze zijn voortgebracht. Een niet-harmonische ligging van de frequentiecomponenten komt evenwel in de praktijk ook voor. Een typisch voorbeeld is de bejaardklok. Het viel Lord Rayleigh (1894) reeds op dat géén der eigenfrequenties van de klokken overeenkwam met de toonhoogte van de slagtoon.

Pas recent is uit een experiment van Smoorenburg (1970) gebleken dat de lagere harmonischen toch van doorslaggevend belang kunnen zijn voor de toonhoogte waarneming. Hij onderzocht toonhoogteverschiuvingen naar het voorbeeld van De Boer. De geluiden bestonden echter uit slechts twee hoge frequentiecomponenten, bijvoorbeeld uit de achtste en de negende harmonische. Op grond van de resultaten moest geconcludeerd worden dat componenten met lagere frequenties die niet in het geluid aanwezig waren, de toonhoogte bepaalden.

Vervormingscomponenten die in het oor opgewekt worden en dicht bij of in het dominante gebied liggen bleken de oorzaak te zijn. (Op deze vervormingscomponenten zullen we nog terugkomen). Zelfs wanneer de vervormingscomponenten zeer zwak waren bleken ze toch bepalend te zijn voor de waargenomen toonhoogte. Maskering van deze vervormingscomponenten beïnvloedde de waargenomen toonhoogte duidelijk in tegenstelling tot het eerder beschreven experiment van Licklider. Kennelijk waren Groen en Hoogland dus terecht beducht voor vervormingscomponenten. Alleen blijkt niet, zoals zij redeneerden en onder meer door Licklider weerlegd werd, de verschilcomponent als een door vervorming opnieuw geïntroduceerde grondtoon een rol te spelen, maar kunnen blijkbaar vervormingscomponenten in het dominante gebied de toonhoogte bepalen. Voor de toonhoogte waarneming in de praktijk is dit echter van weinig belang. Deze vervormingscomponenten zullen slechts aan de toonhoogte waarneming bijdragen als de tonen zeker de eerste vijf harmonischen missen. Bij de telefoon bijvoorbeeld gaat door de beperkte bandbreedte wel een grondcomponent van de spraak verloren maar zeker niet het eerste vijftal harmonischen.

Nadat vast was komen te staan dat juist de harmonischen die door het gehoororgaan worden gescheiden, toonaangevend zijn bij de



harmonische	1	2	3	4	5	6	7	8
noot	G	g	d'	g'	b'	d''	f''	g''
frequentie	98	196	294	392	494	587	698	784 Hz

Fig. 2. Onderlinge ligging van de eerste acht harmonischen bij een grondfrequentie van 98 Hz.

Het oor beluisterd

toonhoogte waarneming en dat de toonhoogte dus niet gebaseerd kan zijn op de periodiciteit die door de hogere (niet gescheiden) harmonischen wordt doorgegeven, werden de toonhoogtetheorieën ontwikkeld in de richting van patroonherkenning. In deze theorieën wordt de toonhoogte bepaald door een patroon dat wordt verkregen uit het frequentiespectrum wanneer men rekening houdt met het beperkte frequentiescheidende vermogen en de dominantie van de derde, vierde en vijfde harmonische. Bij verschuiving van de frequentiecomponenten zoals deze door De Boer werd geïntroduceerd, voorspellen deze theorieën toonhoogteverschuivingen vergelijkbaar met de meetresultaten. Wanneer alle harmonischen bij een grondfrequentie van 200 Hz bijvoorbeeld met 30 Hz worden verhoogd, dan betekent een dominante vierde harmonische dat we een toonhoogteverschuiving zullen vinden die correspondeert met een frequentieverschuiving van 200 Hz naar $(4 \times 200 + 30)/4 = 207,5$ Hz.

Hifi-apparatuur en toch 25 procent vervorming in het oor

Al eerder brachten we naar voren dat er in het gehoororgaan vervorming van geluid kan optreden. Deze vervorming kan wel 25 procent bedragen; veel meer dan tegenwoordig bij hifi-apparatuur getolereerd wordt. Toch wordt er door de fabrikanten van deze apparatuur (met name door die van de pick-up elementen, luidsprekers) nog naarstig gestreefd naar het terugdringen van de vervorming omdat deze nog niet onhoorbaar is geworden. We zullen hier nader ingaan op deze schijnbare tegenstelling.

We spreken van vervorming in het gehoororgaan wanneer we deeltönen horen met toonhoogten die niet corresponderen met een frequentiecomponent van het geluid. We noemden reeds de verschiltone die correspondeert met $f_2 - f_1$ terwijl deze component niet in het geluid aanwezig is maar wel de componenten f_1 en f_2 ($f_2 > f_1$). De vervormingscomponenten die in het hiervóór aangehaalde experiment van Smoorenburg een rol speelden in de buurt van het voor de toonhoogte waarneming dominante gebied correspondeerden met $2f_1 - f_2$, $3f_1 - 2f_2$ en $4f_1 - 3f_2$. Al deze door het gehoororgaan geïntroduceerde vervormingscomponenten worden combinatietonen genoemd omdat ze corresponderen met (eenvoudige) combinaties van de frequenties van de geluidscomponenten.

Combinatietonen zijn reeds lang bekend. Musici zoals Sorge, Romieu en Tartini rapporteerden ze al rond 1750. Sinds het boek van Von Helmholtz uitkwam (1863) werden ze beschouwd als tamelijk vanzelfsprekende vervormingsproducten. Von Helmholtz liet zien dat dit soort vervormingsproducten kunnen ontstaan wanneer een trillend object niet precies de aandrijvende kracht kan volgen. Dit zou dan ook kunnen gelden voor het trommelvlies dat door het geluid in trilling wordt gebracht. Naarmate de aandrijvende kracht groter wordt zal het trillende object minder goed volgen en zullen de vervormingscomponenten sterker worden. In deze visie zullen combinatietonen dus vooral voorkomen bij hoge geluidsniveaus.

Onderzoek van Goldstein die in 1966/67 uit de Verenigde Staten als gast in het Instituut voor Perceptie-Onderzoek te Eindhoven werkzaam was, liet echter zien dat sommige combinatietonen reeds bij lage geluidsniveaus in sterke mate aanwezig kunnen zijn. Goldstein voegde aan geluid dat slechts uit de frequentiecomponenten f_1 en f_2 bestond, een frequentiecomponent $2f_1 - f_2$ toe en kon door de amplitude en fase van deze component te variëren een amplitude en fase vinden waarbij de combinatietoon corresponderend met $2f_1 - f_2$ uitdooft. Zo werd dus een omgekeerde situatie bereikt. Waar eerst de combinatietoon gehoord werd terwijl er geen component $2f_1 - f_2$ in de stimulus aanwezig was, ontstond nu een situatie waarin de combinatietoon niet meer gehoord werd, terwijl de component $2f_1 - f_2$ aan de stimulus was toegevoegd. De sterkte van de combinatietoon werd afgeleid uit de amplitude van de toegevoegde component $2f_1 - f_2$ waarbij de combinatietoon uitdooft. Deze amplitude bleek bij frequentieverschillen van vijftien procent ($f_2/f_1 = 1,15$) ongeveer vijftien procent van de amplituden van f_1 en f_2 te bedragen. Tevens

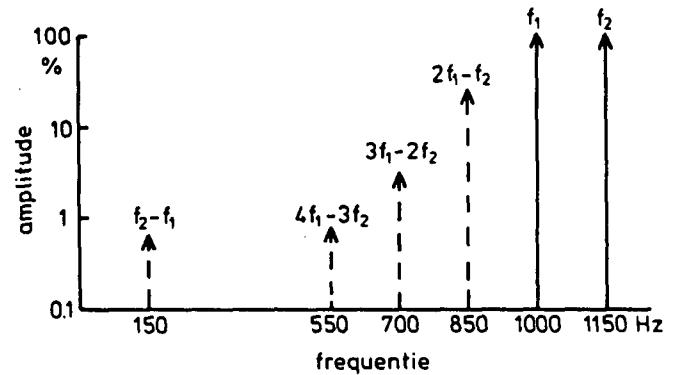


Fig. 3. Amplituden van de in het gehoororgaan gevormde combinatietonen $f_2 - f_1$, $2f_1 - f_2$, $3f_1 - 2f_2$ en $4f_1 - 3f_2$ ten opzichte van de geluidscomponenten f_1 en f_2 .

bleek deze vijftien procent niet te veranderen wanneer het geluidsniveau van de stimulus werd gevarieerd over een groot bereik tot vlak boven de waarnemingsdrempel. Goldstein sprak daarom van een essentieel niet-lineair gedrag van het gehoororgaan in tegenstelling tot de eerder door Von Helmholtz voorgestelde vervorming die toeneemt met het verhogen van het geluidsniveau.

Sinds deze resultaten bekend werden is er veel onderzoek aan combinatietonen verricht. Ook andere niet-lineaire verschijnselen werden onderzocht zoals het minder sterk worden van een toon wanneer een tweede sterkere toon van een iets andere frequentie wordt toegevoegd. Dit verschijnsel staat bekend als laterale suppressie. Een recente vondst is dat er zelfs geluid uit het oor naar buiten treedt. We kunnen het oor dus ook in letterlijke zin beluisteren, zij het dat dit geluid zeer zwak is. In het uitgestraalde geluid worden de combinatietonen teruggevonden. Dit resultaat en de mogelijkheid de combinatietoon met een stimuluscomponent te elimineren wijzen op een oorsprong van de combinatietoon die vooraan in het gehoororgaan moet zijn gelegen. Anderzijds is echter gebleken dat de combinatietonen $2f_1 - f_2$, $3f_1 - 2f_2$ en $4f_1 - 3f_2$ tijdelijk in sterkte terugvallen nadat het oor is blootgesteld aan geluid van zo'n hoog niveau dat de fysiologische conditie van de receptorcel (de haarcel) in het slakkehuis en van de zenuw tijdelijk zijn aangetast. Dit wijst op een wat verder gelegen oorsprong van deze combinatietonen. Waarschijnlijk ligt hun oorsprong in het slakkehuis en wel in het receptororgaan zelf (in het orgaan van Corti). Aangezien we nog weinig weten van de omzetting van de geluidtrillingen in zenuwactiviteit die in dit receptororgaan plaatsvindt kan juist de studie van combinatietonen bijdragen aan onze kennis van deze omzetting.

We kunnen ons nu afvragen waarom de vervorming in hifi-apparatuur zo gering moet zijn als het gehoororgaan zulke sterke combinatietonen voortbrengt. Het antwoord is dat in het gehoororgaan sterke combinatietonen zoals $2f_1 - f_2$ en $3f_1 - 2f_2$ slechts ontstaan als de frequenties van de geluidcomponenten dicht bij elkaar liggen. In dat geval liggen de combinatietonen ook dicht bij de geluidcomponenten en vallen daarom niet op (zie fig. 3). In feite vereist het oefening om deze combinatietonen te kunnen horen. Voorts vallen deze combinatietonen ook niet op wanneer de geluidssterkte wordt gevarieerd omdat hun sterkte in vrijwel gelijke mate mee varieert. Wanneer combinatietonen relatief sterker zouden worden bij toenemend geluidsniveau dan mag men wel verwachten dat ze worden opgemerkt. Dit is bijvoorbeeld het geval voor de verschiltone $f_2 - f_1$ die echter bij middelmatige geluidsniveaus nog maar zeer zwak door het gehoororgaan wordt voortgebracht. Het horen van een verschiltone kan daarom zowel het gevolg zijn van vervorming in het gehoororgaan als van vervorming in de geluidweergave. Vervorming in de geluidweergave wordt al gauw duidelijk wanneer deze leidt tot het ontstaan van boventonen ($2f_1$, $3f_1$, enz.) en somtonen ($f_1 + f_2$, $2f_1 + f_2$, enz.). Deze tonen worden namelijk vrijwel niet gevonden als producten van vervorming in het gehoororgaan.

G. F. Smoorenburg (1943) is wetenschappelijk medewerker in de afdeling Audiologie van het Instituut voor Zintuigfysiologie TNO te Soesterberg en sinds kort ook verbonden aan de afdeling Keel-, Neus- en Oor-Heelkunde van de Faculteit der Geneeskunde te Utrecht. Hij verrichtte onderzoek op het gebied van de toonperceptie, elektrofyysiologie van het gehoororgaan en lawaaislechthorendheid.

R. Plomp (1929) is hoofd van de afdeling Audiologie van het Instituut voor Zintuigfysiologie TNO te Soesterberg en buitengewoon hoogleraar in de experimentele audiologie aan de Faculteit der Geneeskunde van de Vrije Universiteit te Amsterdam. Zijn terrein van onderzoek is de toonperceptie en de spraakperceptie van normaal- en slechthorenden.

Op toon gebrachte zenuwcellen

We hebben vastgesteld dat het gehoororgaan een toon scheidt in een aantal deeltönen die corresponderen met frequentiecomponenten van het geluid en we zullen laten zien dat dit frequentiescheidend-vermogen is terug te vinden in de gehoorzenuw. Daartoe plaatsen we bij een proefdier een micro-elektrode met een punt ter dikte van enige microns in de zenuwbundel zo dicht mogelijk bij het slakkehuis, zie fig. 4a. Met de micro-elektrode zijn we in staat aan afzonderlijke zenuwcellen te meten. De activiteit van de zenuwcel uit zich op de elektrode als kortdurende spannings-sprongen, zie fig. 4b. Grootte en vorm van deze spannings-sprongen, ook wel zenuwimpuls genoemd, worden niet door de stimulus beïnvloed. De stimulus is slechts van invloed op het aantal impulsen dat per seconde door de zenuwcel wordt afgevuurd en de momenten waarop deze impulsen verschijnen. In afwezigheid van geluid vuren de meeste cellen in de gehoorzenuw al spontaan impulsen af, soms tot wel 100 per seconde. Bij stimulatie met geluid kan de zenuwactiviteit oplopen tot 500 impulsen per seconde. De activiteit blijft af te hangen van de stimulusfrequentie. In ons voorbeeld van fig. 4c vinden we bij een laag geluidsniveau slechts voor stimulusfrequenties rond 1 kHz een verhoging ten opzichte van de spontane activiteit. Naarmate het geluidsniveau wordt verhoogd neemt het frequentiegebied waarover verhoogde activiteit wordt gemeten toe. De grens van het gebied van verhoogde activiteit vormt een afstembromme. Een dergelijke afstembromme wordt voor iedere zenuwcel gevonden. De afstembromme (1 kHz in fig. 4c) verschilt echter per zenuwcel. Er blijkt een duidelijke relatie te bestaan tussen de ruimtelijke ordening van de zenuwcellen en de frequentieschaal. Voor de hersenen betekent verhoogde activiteit in een bepaalde zenuwcel dus dat het geluid componenten in een bepaald frequentiegebied bevat.

De aanwezigheid van een bepaalde frequen-

Geponeerd

"De manier waarop het menselijk oor en brein in staat is om het gesproken woord uit een hoog ruisniveau te detecteren, te isoleren en te verstaan, om zelfs de spreker bovendien te identificeren is onvoldoende begrepen".

Stelling bij het proefschrift: "Orthogonal filters" waarop E. Depirette op 13 oktober 1981 promoveerde tot doctor in de Technische wetenschappen aan de Technische Hogeschool te Delft.

Het oor beluisterd

tiecomponent in het geluid kan niet alleen worden afgeleid uit verhoogde activiteit van een bepaalde zenuwcel maar ook uit de momenten waarop de zenuwimpuls verschijnt. Dit is te zien in fig. 4b waar we de zenuwimpuls die verschenen gedurende sinusvormige stimulatie hebben weergegeven ten opzichte van twee perioden van de sinus. De zenuwimpuls blijken niet gelijkmatig over de perioden verspreid voor te komen, maar vooral tijdens een bepaald gedeelte van de perioden. Op ieder moment is de kans dat een zenuwimpuls wordt afgevuurd afhankelijk van de golfvorm. Het is zelfs mogelijk de golfvorm van de stimulus terug te construeren uit de momenten waarop de zenuwimpuls wordt afgevuurd. Een resultaat hiervan zullen we laten zien in fig. 5b. Het zal duidelijk zijn dat in fig. 4b niet de reactie van de zenuwcel op slechts twee perioden is weergegeven want dit zou bij een stimuluscomponent van 1000 Hz een zenuwactiviteit betekenen van vele duizenden impulsen per seconde. Zelfs zenuwcellen in de gehoorzenuw kunnen dit niet bijbenen. Fig. 4b' zou echter wel goed de gezamenlijke activiteit van een aantal zenuwcellen kunnen voorstellen die ongeveer op dezelfde frequentie zijn afgestemd. In het tijdpatroon van deze gezamenlijke activiteit is dus duidelijk informatie aanwezig over de frequentie van een geluidcomponent. Het is evenwel nog steeds een open vraag of bij de waarneming deze informatie door de hersenen ook wordt gebruikt. Gaan we nu terug naar de combinatietonen dan zou het inmiddels duidelijk kunnen zijn hoe deze zouden kunnen worden aangetoond in de zenuwactiviteit. We zoeken daartoe bijvoorbeeld een zenuwcel op die is

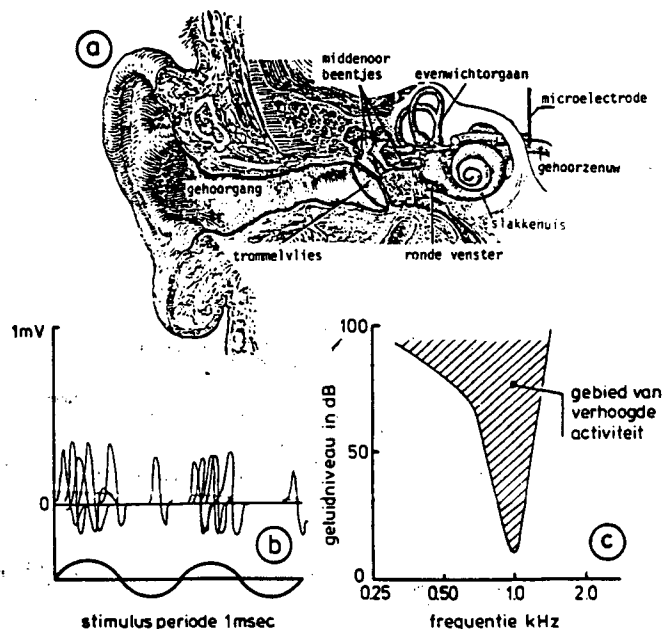


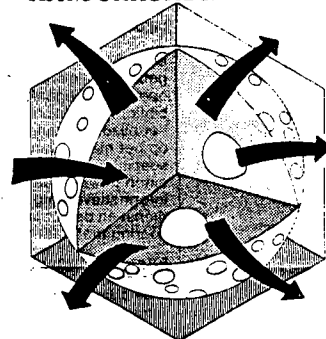
Fig. 4a. Het menselijk gehoororgaan. De positie van de micro-elektrode in de gehoorzenuw is ook aangegeven alhoewel deze zenuwafleidend niet in de gehoorzenuw van een mens maar in die van een proefdier wordt geplaatst.

Fig. 4b. In de gehoorzenuw verschijnen zenuwimpulsjes vooral tijdens een bepaald gedeelte van de stimulusperiode.

Fig. 4c. Iedere zenuwcel in de gehoorzenuw reageert op geluidcomponenten in een beperkt frequentiegebied; de afstemfrequentie (1 kHz in de figuur) verschilt per cel.

afgestemd op 1000 Hz. Sinusvormige stimulatie met $f_1 = 1400$ Hz of met $f_2 = 1800$ Hz geeft geen verhoging van de zenuwactiviteit te zien. Presenteren we die twee frequentiecomponenten echter tegelijkertijd, dan wordt wel een verhoging van de activiteit gevonden. Tevens blijkt dan het tijdpatroon van de zenuwimpulsjes te wijzen op een frequentiecomponent van 1000 Hz. Deze frequentie komt overeen met die van de combinatietoon $2f_1 - f_2$. Een kleine verandering van de frequentie f_1 of f_2 wordt gevolgd door een verandering in het tijdpatroon van de zenuwimpulsjes zodanig dat dit patroon blijft corresponderen met $2f_1 - f_2$. Hiermede is de aanwezigheid van de combinatietoon in de zenuwactiviteit die het slakkenhuis afgeeft ruimschoots aangetoond. Andere combinatietonen kunnen op soortgelijke wijze elektrofysiologisch worden aangetoond. Tevens kan de sterkte van de combinatietonen worden afgeleid uit het aantal zenuwimpulsjes dat per seconde wordt afgevuurd. Het resultaat komt goed overeen met de psychofysisch gevonden sterkte van de combinatietonen. Gaan we nog een stap terug naar hetgeen we schreven over het vermogen van het gehoororgaan omgeveer de eerste vijf harmonischen te kunnen scheiden, dan kunnen we ook dat fraai demonstreren aan de hand van elektrofysiologische meetresultaten. Als voorbeeld gaan we uit van een zenuwcel die is afgestemd op 3000 Hz. We presenteren geluiden bestaande uit vele harmonischen die elkaar vanaf de grondcomponenten opvolgen en van gelijke sterkte zijn. Nemen we als grondfrequentie 3000 Hz, dan vinden we een duidelijke verhoging van de zenuwactiviteit. Vervolgens zouden we kunnen nagaan of zenuwcellen die op 6000 Hz zijn afgestemd ook een verhoogde activiteit vertonen vanwege de aanwezigheid van de tweede harmonische in het geluid. Zo'n cel kan echter niet even vlug met de elektrode worden aangeprikt. Handiger is het daarom de grondfrequentie te verlagen tot 1500 Hz zodat de tweede harmonische op de afstemfrequentie van de reeds aangeprikte zenuwcel terechtkomt. Fig. 5a laat zien wat we vinden als de grondfrequentie systematisch wordt verlaagd. In de zenuwactiviteit zijn vijf maxima te onderscheiden die geïnterpreteerd kunnen worden als reacties op de eerste vijf harmonischen. Links daarvan, bij de lagere grondfrequenties, vinden we slechts wisselingen in de curve die het gevolg zijn van statistische fluctuaties in de zenuwactiviteit. De vijf maxima komen mooi overeen met het resultaat uit de psychofysica

waar we ook vijf harmonischen bleken te kunnen onderscheiden. Wij gaven reeds aan dat het mogelijk is de vervolg op pagina 35

BIOFYSICA:
LEVENDE
NATUURKUNDE

In de serie Biofysica: levende natuurkunde verschijnen eerder:

Prof. dr. A. J. H. Veldrik en dr. J. J. Vos: Vijftig jaar biofysica in Nederland	1981 nr. 45
H. J. C. Berendsen: Biofysica op moleculaire schaal	nr. 47
Dr. S. W. de Laat en dr. W. M. Moolenaar: De celmembranen regelcentrum van groei en ontwikkeling	nr. 49
Prof. dr. W. N. Konings: Energie-omzettende processen in membranen van bacteriën	nr. 51
J. Ames en W. J. Vredenberg: Een spel van fotonen, protonen en elektronen	1982 nr. 1
D. Stavenga en H. Spekrijse: Licht in het oog	nr. 3
Dr. ir. T. Houtgast en dr. J. J. Vos: Psychofysica	nr. 5
Serie redactie: Dr. Doekle Stavenga Drs. Margot Chamalaun	

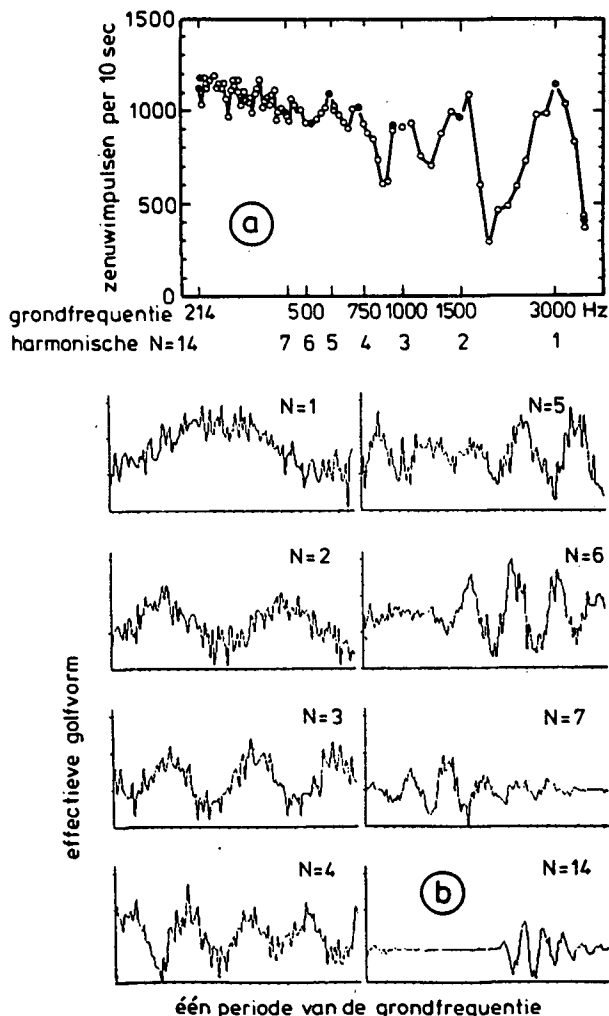


Fig. 5a. Frequentie-analyse in het gehoororgaan. Wanneer de grondfrequentie van geluid dat uit vele harmonischen bestaat wordt verlaagd, dan vinden we een vijftal maxima in de activiteit van een zenuwcel die het gevolg zijn van reacties op de eerste vijf harmonischen. De hogere harmonischen worden door het gehoororgaan niet gescheiden.

Fig. 5b. In de momenten waarop de zenuwimpulsjes verschijnen wanneer de zenuwcel reageert op een harmonische vinden we de sinusvorm van de afzonderlijke harmonischen terug.

vervolg van pagina 31

Het oor beluisterd

MOGELIJKE BOEKUITGAVE VAN DE SERIE BIOFYSICA: LEVENDE NATUURKUNDE

Bij voldoende belangstelling zal de artikelen-serie 'Biofysica: levende natuurkunde' in boekvorm verschijnen. De serie zal bestaan uit 14 artikelen.

U kunt voor deze boekuitgave intekenen bij Intermediair Lezersservice, Antwoordnummer 91, 1000 PB Amsterdam (geen postzegel), telefoon 020-24.24.04 (ook na kantoor-tijd). Als voorintekenaar heeft u recht op een speciale korting van 15% op de uiteindelijke verkoopprijs van het boek.

Zodra hierover meer gegevens bekend zijn, ontvangt u bericht over prijs, omvang en verschijningsdatum van het boek. U kunt dan alsnog van aankoop afzien door uw voorintekening te annuleren.

Zonder tegenbericht wordt het boek u direct na verschijnen toegezonden tegen de speciale voorintekenaarsprijs + verzendbijdragen van f 1,20.

golfvorm terug te construeren uit de momenten waarop de zenuwimpuls worden afgevuurd. Het resultaat hiervan wordt getoond in fig. 5b. In elk plaatje is de gevonden golfvorm uitgezet ten opzichte van de periode van de grondcomponent. De eerste vier harmonischen blijken als zuivere sinussen te voorschijn te komen, afgezien van statistische fluctuaties. (Dit resultaat is te vergelijken met de toelichting op het begrip frequentie-analyse). Daarboven wordt steeds duidelijker een amplitudemodulatie van de sinussen zichtbaar. Deze modulatie betekent dat naast elkaar liggende harmonischen niet geheel worden gescheiden. We zien hoe met de modulatie de periodiciteit van de grondfrequentie terugkomt in de zenuwactiviteit.

Zoals we al eerder beschreven dacht Schouten dat deze periodiciteit van de zenuwactiviteit een rol zou kunnen spelen bij de toonhoogstwaarneming: een gedachte die tegenwoordig in twijfel wordt getrokken omdat de derde, vierde en vijfde harmonische dominant bleken te zijn bij de toonhoogstwaarneming.

Slotakkoord

In dit korte bestek hebben we ons bij de psychofysica beperkt tot de toonperceptie. Onderwerpen als geluiddetectie, timbreperceptie om niet te spreken van spraakperceptie werden niet aangeroerd. Juist de toonperceptie werd hier naar voren gebracht omdat Nederlandse onderzoekers daaraan internationaal gezien een bijdrage van betekenis hebben geleverd. Verder hebben we ons bij de elektrofyysiologie beperkt tot illustraties uit eigen werk van hetgeen bij psychofysica aan de orde kwam. We willen dit artikel echter niet besluiten zonder nog in het kort een actueel praktisch onderwerp te belichten. De afstemkromme die in fig. 4c getoond werd kan ook psychofysisch gemeten worden. Aangezien we vanzelfsprekend niet in staat

zijn de activiteit in een bepaald zenuwkanaal selectief waar te nemen, roepen we naast de meettoon de hulp in van een tweede toon, de hulpton, die op een laag geluidniveau wordt aangeboden. Daarmee proberen we te bereiken dat slechts een klein aantal zenuwcellen afgestemd op de frequentie van de hulpton wordt geactiveerd. In plaats van het meten van een verhoogde activiteit van de zenuwcel gaan we nu na bij welke frequenties en geluidniveaus de hulpton onhoorbaar wordt (gemaskeerd wordt) door de meettoon. Op deze wijze kan ook een afstemkromme worden gemeten. Een soortgelijke techniek kan worden gebruikt wanneer we elektrofyysiologische metingen verrichten op enige afstand van de gehoorzenuw zoals dat ook bij mensen kan worden gedaan. Net zo min als in de psychofysica kunnen we dan selectief aan één zenuwcel meten; op afstand meten we slechts de activiteit van de gehele zenuwbundel. Ook dan kunnen we gebruik maken van een hulpton op een laag geluidniveau. We mogen dan weer aannemen dat het elektrofyysiologische signaal afkomstig is van een beperkt aantal zenuwcellen afgestemd op de frequentie van de hulpton.

Voor frequenties van geluidniveaus van de meettoon die overeenkomen met het gebied van verhoogde activiteit in fig. 4c vinden we nu een reductie van de door de hulpton veroorzaakte zenuwactiviteit. De grens van het gebied waarin reductie wordt waargenomen vormt weer een afstemkromme.

We gaan nu na wat er met de op verschillende wijzen gemeten afstemkrommen gebeurt als iemand slechthorend is, bijvoorbeeld ten gevolge van blootstelling aan te veel lawaai. We vinden dan pas een reactie op het geluid bij hogere geluidniveaus: het gehoororgaan is minder gevoelig geworden. Voor de afstemkromme betekent dit dat de punt van de kromme naar boven verschuift. De flanken van de afstemkromme blijken echter niet evenwijdig mee naar boven te verschuiven.

De afstemkromme wordt breder! Dit betekent dat het frequentiescheidend vermogen is teruggelopen. Voor de praktijk betekent dit dat deze slechthorenden minder goed in staat zullen zijn waarschuwingssignalen in een lawaaiige omgeving op te vangen of spraak in geroezemoes te verstaan. In omgevingslawaai zullen deze slechthorenden ook vaak niet gebaat zijn bij een hoortoestel. De geluidniveaus zijn dikwijls zo hoog dat men ook zonder hoortoestel best iets hoort maar men is niet in staat het belangrijke geluid te onderscheiden van het stoornislawaaai. Het hoortoestel versterkt, zowel het gewenste geluid als het lawaai terwijl de slechthorende behoefte heeft aan een versterking van het belangrijke geluid ten opzichte van het lawaai. Dit kan bijvoorbeeld bereikt worden door een hulpmiddel dat gericht kan worden op de geluidbron. In dit opzicht was de hoorn die vroeger door slechthorenden gebruikt werd nog niet zo gek. Daarnaast moet men denken aan een betere akoestiek. Gezien de snelle opmars van de micro-elektronica zijn in de toekomst wellicht ook handzame hulpmiddelen te ontwikkelen die met behulp van signaalbewerkingstechnieken de invloed van het stoornislawaaai op de waarneming kunnen terugdringen. Daarbij zal het zeer belangrijk zijn te weten, speciaal voor de slechthorende, welke facetten van geluid en taal belangrijk zijn bij de spraakperceptie. □

Literatuur

- H. von Helmholtz, *Die Lehre von den Tonempfindungen als Physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*, F. Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1913.
H. L. F. von Helmholtz, *On the Sensations of Tone*, Dover Publications, New York, 1954 (vertaling).
R. Plomp, *Aspects of Tone Sensation*, Academic Press, London, 1976.
B. C. J. Moore, *Introduction to the Psychology of Hearing*, The MacMillan Press, Ltd., London, 1977.



Drs. W. Passchier-Vermeer is medewerkster op de Afdeling geluid, licht en binnenklimaat van het Instituut voor milieuhygiëne en gezondheidstechniek TNO.

Onderzoek in opdracht van het Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne.

POPMUZIEK EN GEHOORSCHADE

DRS. W. PASSCHIER-VERMEER

In een gefaseerd onderzoek is nagegaan of het beluisteren van popmuziek in discotheken, bij popconcerten etc. en het luisteren thuis met hoofdtelefoons op, op de lange duur blijvende gehoorverliezen veroorzaakt. Uit het onderzoek bij een geselecteerde groep 20- tot 30-jarigen is onder meer gebleken dat de gehoorverliezen bij 500, 1000, 16000 en 8000 Hz van hen die vaak discotheken etc. bezochten of nog bezoeken groter zijn dan de gehoorverliezen van personen die dit niet deden of deden. Bij matig veel bezoeken (in totaal 50 tot 400 maal) zijn de gehoorverliezen ten hoogste zo'n 2,5 dB groter, bij veel bezoeken (meer dan 400 maal) zo'n 2 à 4 dB en bij zeer veel bezoeken (meer dan 800 maal) 3 à 6 dB. Er kon geen aantoonbaar effect op de gehoorscherpheid geconstateerd worden van het beluisteren van popmuziek met behulp van hoofdtelefoons. Wat betreft de consequenties van de geconstateerde gehoorverliezen in het kader van de volksgezondheid is geconcludeerd dat het met gehoorschade door popmuziek nogal meevalt.

In het onderzoek is tevens aan het licht gekomen dat zowel roken als het geluid door knallend vuurwerk tot gehoorverlies van een deel der onderzochte groep hebben bijgedragen, hoewel de onderzochte groep niet geselecteerd is op veelvuldig roken en het veelvuldig afsteken van

knallend vuurwerk. Niettemin blijken de geconstateerde effecten op de gehoorscherpheid van vergelijkbare grootte te zijn als de gehoorverliezen van degenen die vaak een discotheek etc. bezochten of nog bezoeken.

Nader onderzoek naar deze effecten is dringend gewenst.

Het beluisteren van popmuziek is een wijdverbreid verschijnsel. De discotheken floreren, popconcerten zijn uitverkocht en drive-in shows trekken volle tenten. Een groot deel van de jeugd lijkt verslingerd aan de popmuziek. Er wordt niet alleen in gelegenheden naar popmuziek geluisterd, maar ook neemt het luisteren thuis naar popmuziek bij velen een belangrijke plaats in het leven in. Een nieuwe rage schijnt het gebruik van hoofdtelefoons die aangesloten zijn op kleine radio's en cassette-reorders, die op straat, in winkels etc. gebruikt worden.

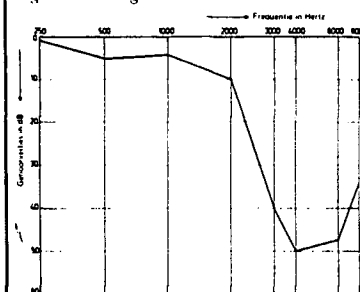
Vele ouders zien het met lede ogen aan dat hun kroost gelegenheden bezoekt waar popmuziek ten gehore wordt gebracht. "Pas toch op, je wordt nog eens doof van al die herrie" is vaak het motto waaronder het bezoek wordt ontraden. Ook andere redenen waarom dergelijke bezoeken door de ouders als ongewenst worden gezien spelen vaak een rol. Over die al dan niet gegronde andere redenen gaat het in dit verhaal helemaal niet. Deze publikatie is beperkt tot de vraag of popmuziek gehoorbeschadiging zou kunnen veroorzaken.

Vele bezoekers van discotheken en popconcerten weten uit ervaring dat er kort na een bezoek aan een dergelijke gelegenheid een dof gevoel in de oren overblijft. Men is een beetje dovig en soms treden er ook nog enige tijd oorsuizingen op. Deze tekenen wijzen op een overprikkeling van het gehoor en wel met name van de zenuwcellen die zich in het binnenoer bevinden. Meestal is dit een tijdelijk effect: na enige uren of dagen rust herstelt het gehoor zich. Als een dergelijke overprikkeling echter steeds wordt herhaald, is er kans dat er op den duur blijvende effecten optreden: het slechter horen blijft en de oorsuizingen zijn een blijvend hinderlijk verschijnsel. Aan die blijvende effecten is niets meer te doen: geen prikken, geen pillen en zelfs geen oorroperatie.

Of het gehoor verslechterd is, dat wil zeggen dat de gehoorscherpheid verminderd is, kan worden vastgesteld door middel van gehoormetingen (audiometrie). Bij deze gehoormetingen stelt men vast welk gehoorverlies er is bij het beluisteren van tonen. Bijvoorbeeld een gehoorverlies van 30 dB bij een toonhoogte (frequentie) van 1000 Hz 30 dB luider moet zijn dan de nulrempel van de audiometer, om net gehoord te worden. Deze nulrempel is

gemiddeld het niveau dat door een geselecteerde groep 18- tot 25-jarigen juist gehoord wordt. Door nu bij een aantal toonhoogten (frequenties) het gehoorverlies van een oor te bepalen en deze gehoorverliezen in een grafiek uit te zetten ontstaat een audiogram. In figuur 1 is een audiogram afgebeeld.

Figuur 1: Audiogram

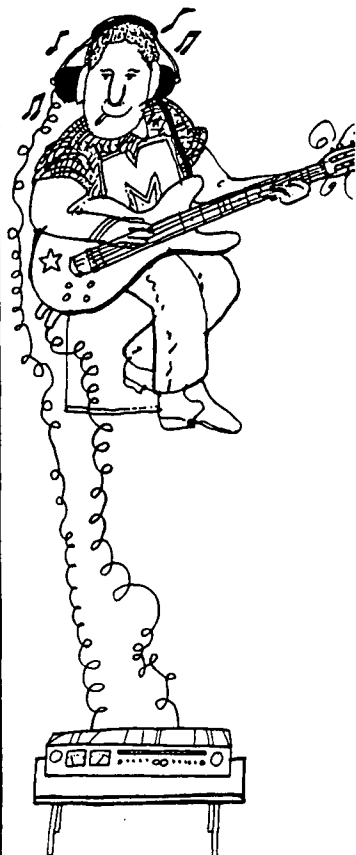


Beschouwen we het luistergedrag ten aanzien van popmuziek nader, dan zijn een drietal categorieën te onderscheiden. Allereerst het luisteren thuis en/of bij vrienden naar radio, tv, platen, cassette- en bandrecorder. Dit luisteren geeft hoogstwaarschijnlijk geen kans op gehoorschade, omdat de omgeving veelal zeer hoge geluidsniveaus niet of niet lang tolereert. De tweede categorie betreft het luisteren naar popmuziek door middel van hoofdtelefoons. Er is vastgesteld dat de niveaus onder deze telefoons gemiddeld zo'n 90 dB(A) zijn. Gaan we ervan uit dat gehoorbeschadiging kan ontstaan door veelvuldige expositie aan niveaus van ten minste 75 à 80 dB(A) – dit is aangetoond voor beroepsmatige exposities van 8 uur per werkdag die jarenlang achtereen plaatsvinden – dan is er de kans dat het beluisteren van popmuziek door hoofdtelefoons gehoorschade kan veroorzaken. Dit geldt te meer voor de derde categorie: het luisteren in gelegenheden waar popmuziek ten gehore wordt gebracht (popconcerten, drive-in shows, discotheken). Uit buitenlands onderzoek is gebleken dat het equivalente geluidsniveau tijdens popconcerten (waar "live" opgetreden wordt) gemiddeld zo'n 100 dB(A) is en in discotheken (als de muziek door middel van platen, cassette-recorders of bandrecorders via luidsprekers gereproduceerd wordt) gemiddeld zo'n 90 dB(A).

Dit zijn dus niveaus die bij geregelde jarenlange beroepsmatige exposities gehoorschade veroorzaken. De vraag is echter of gehoorschade optreedt bij minder geregelde exposities aan popmuziek. Om op die vraag een antwoord te kunnen geven, is door het Instituut voor Milieuhygiëne en Gezondheidstechniek TNO (IMG-TNO) in opdracht van het Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne onderzoek verricht.

Eerste oriënterend onderzoek

Het eerste onderzoek is verricht aan een vrij willekeurige groep jonge mensen: 281 sollicitanten voor de bedrijfs-



Hoofdtelefoons en gehoorverlies.

vakschool van de Nederlandse Spoorwegen N.V. Deze sollicitanten waren vrijwel uitsluitend leerlingen van lagere technische scholen en 16 tot 18 jaar oud. Deze jonge populatie is gekozen omdat de verwachting bestond dat er onder jongeren veel personen zouden voorkomen die geregeld gelegenheden bezoeken waar popmuziek ten gehore wordt gebracht. Ook organisatorisch leende deze groep zich uitstekend voor onderzoek, omdat er bij deze sollicitanten toch al routinematig gehooronderzoek werd verricht.

Aansluitend op het gehooronderzoek is de sollicitanten gevraagd een eenvoudige vragenlijst in te vullen. De vragen betroffen eventuele huidige of vroegere klachten over het gehoor (oorpijn, oorsuizen, bezoek oorarts/audiologisch centrum), lawaaiige werk- of schoolomstandigheden en de mate waarin popmuziekgelegenheden werden bezocht en thuis of bij vrienden hoofdtelefoons werden gebruikt. Op grond van de antwoorden op de vragenlijst zijn er 139 jongeren geselecteerd, waarvan er 46 nog nooit een gelegenheid hadden bezocht waar popmuziek ten gehore wordt gebracht. De tijd die de resterende 93 jongeren gemiddeld in discotheken en bij popconcerten doorbrachten bleek twee uur per week te zijn.

De gehoorverliezen van de groep jongeren die discotheken en popconcerten bezochten zijn vergeleken met de gehoorverliezen van de andere groep. Het bleek dat er geen aantoonbaar verschil tussen deze gehoorverliezen bestonden. Dit houdt dus in dat de gehoorschep van beide groepen niet van elkaar verschilt: de popmuziek heeft kennelijk bij deze totale expositieduur geen invloed gehad op de gehoorschep. Ook bleek het gehoorverlies van de groep van 28 jongeren die het meest frequent popmuziekgelegenheden bezochten niet af te wijken van de groep die deze gelegenheden niet of minder frequent bezochten.

Het enige dat zou kunnen wijzen op een effect van popmuziek op de gehoorschep bleek het volgende te zijn. Bij de groep 18-jarige bezoekers bleek de gehoorschep bij de zeer hoge tonen (6000 Hz) aantoonbaar slechter te zijn (verschil 5 dB) dan die van de 16- en 17-jarige bezoekers en die van de niet-bezoekers. Als er aangenomen wordt (dat viel uit de vragenlijst niet op te maken) dat de 18-jarigen gemiddeld één à twee jaar langer popmuziekgelegenheden bezochten dan de 16- en 17-jarigen, dan zou dit effect erop kunnen wijzen dat popmuziek inderdaad de gehoorschep verslechtert, te meer als een dergelijk leeftijds-effect niet op zou treden bij de groep die nooit popmuziekgelegenheden bezocht. Helaas kon dit bij de laatste groep niet worden nagegaan, omdat het aantal 18-jarigen in deze groep te gering was (vier in totaal).

Resumerend dient dus gesteld te worden dat er bij deze vrij willekeurige groep jongeren geen gehoorverlies door popmuziek kon worden aangetoond.

Bepaling van de populatie voor verder onderzoek

Na de "trouble shooting" in het eerste onderzoek – waaruit dus is gebleken dat gehoorschade door popmuziek niet zomaar aantoonbaar is bij een vrij willekeurige groep heel jonge mensen – hebben we ons de volgende vragen gesteld: is de tot nu toe onderzochte groep (evenals de groepen waarover in de literatuur is gerapporteerd) te rekenen tot de ten aanzien van popmuziek zwaar belaste groepen? Of zijn er groepen die veel vaker en/of veel langer naar popmuziekgelegenheden gaan en met hoofdtelefoons naar popmuziek luisteren? Zou er dan bij de zwaarst belaste groepen soms wel gehoorschade door popmuziek aangetoond kunnen worden? En daaruit voortvloeiend de vraag wat dan de kenmerken van deze meer belaste groepen zijn ofwel de vraag wat dat dan voor groepen mensen zijn? Daarbij gaan wij uit van de veronderstelling dat naarmate de expositie aan popmuziek in totaal toeneemt, de kans op gehoorverlies door popmuziek ook toeneemt.

Om de hiervoor gestelde vragen te beantwoorden is een gefaseerd onderzoek uitgevoerd. In de eerste fase is er een omnibusenquête gehouden met enkele eenvoudige vragen die tot doel hadden de respondenten voor fase 2 te selecteren. In fase 2 zijn de geselecteerde respondenten verder uitgebreid ondervraagd om te komen tot een profilering van de zwaarst belaste groepen.

De enquêtes zijn gehouden door de N.V. v/h Nederlandse Stichting voor Statistiek in opdracht van het IMG-TNO. De omnibusenquête, zoals genoemde Stichting deze verzorgt, is een enquête die wekelijks wordt gehouden bij ongeveer 1200 Nederlandse huishoudens. Deze huishoudens vormen te zamen een steekproef die representatief is voor de populatie van huishoudens in Nederland. In principe wordt de huisvrouw of de alleenstaande ondervraagd. Soms worden ook andere gezinsleden ondervraagd, als dit relevant is en dezen op het moment van ondervraging aanwezig zijn. In de eerste fase van het onderzoek is er viermaal meegedraaid in de omnibusenquête en zijn er 4894 huisvrouwen/alleenstaanden ondervraagd.

Uitgaande van de omnibusenquête was er bij 788 huishoudens bereidheid om aan fase 2 van het onderzoek deel te nemen. Hieruit werden de huishoudens gekozen waarin ten minste één persoon soms of altijd met een hoofdtelefoon op naar popmuziek luistert en/of popmuziekgelegenheden bezoekt.

Er voldeden 226 huishoudens aan deze eis en er werden uiteindelijk gesprekken gevoerd met 251 personen die in de periode van het onderzoek met hoofdtelefoons naar popmuziek luisterden en/of popmuziekgelegenheden bezochten.

Uit de omnibusenquête is gebleken dat in Nederland in 61% der gezinnen min of meer regelmatig door één of meer personen naar popmuziek wordt geluisterd. Deze 61% der gezinnen bestaan in totaal uit bijna 15.000 personen. Van deze bijna 15.000 personen luistert 48% min of meer

Kenmerk	Percentage van de onderzochte groep	Landelijk percentage
15- tot 19-jarig	43	9
20- tot 29-jarig	42	17
Man	62	50
Ongehuwd	69	49
In het westen van Nederland woonachtig	56	45
In middelgrote steden en op verstedelijk platteland woonachtig	62	54
Studerend/schoolgaand	41	18
Employé	32	25
Werkend bij de bouw/industrie	14	9
Werkend bij de overheid	39	35
Hoger/middelbaar onderwijs ontvangen(d)	66	44
Uit de lagere sociale middenklasse	60	46

Tabel 1: Kenmerken die in de onderzochte groep popmuziek liefhebbers relatief meer voorkomen dan landelijk en het desbetreffende percentage van de onderzochte groep met dat kenmerk.

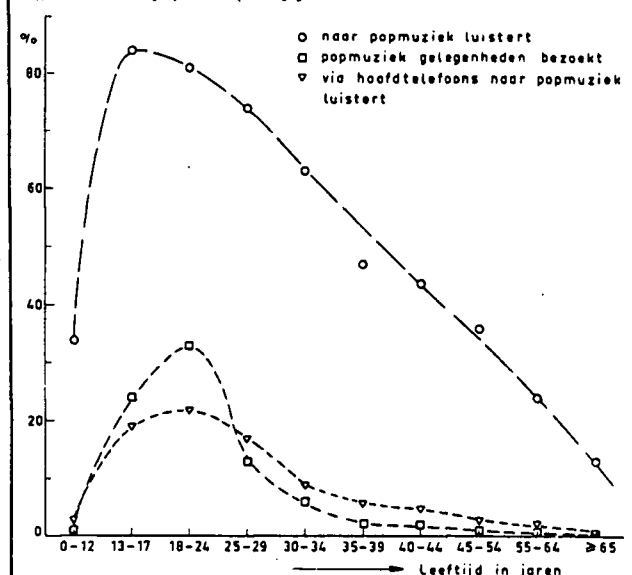
regelmatig thuis of ergens anders naar popmuziek, 8% bezoekt popmuziekgelegenheden en 8% heeft als men naar popmuziek luistert soms of altijd hoofdtelefoons op. Een verdeling naar leeftijd is gegeven in figuur 2.

Het bleek dat ruim 80% der 13- tot 24-jarigen min of meer regelmatig naar popmuziek luistert. Het bezoek aan popmuziekgelegenheden komt eveneens maximaal in de leeftijdsgroep van 13 tot 24 jaar voor, hoewel er toch ook nog een niet geheel verwaarloosbaar percentage 30- tot 40-jarigen is dat popmuziekgelegenheden bezoekt.

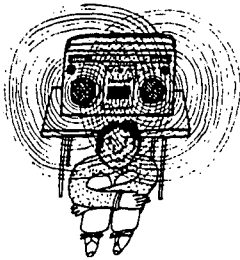
Door middel van een zeer uitgebreide vragenlijst zijn de 251 respondenten uit de tweede fase aan een uitvoerig onderzoek onderworpen. In tabel 1 zijn die persoonskenmerken en die demografische kenmerken van de onderzochte groep popmuziek liefhebbers opgenomen, die in vergelijking tot de landelijke cijfers oververtegenwoordigd zijn.

Geen aantoonbaar verschil in gehoorverlies bij discotheekbezoekers.

Figuur 2: Percentage personen per leeftijdsklasse, dat:



BIJLAGE I2



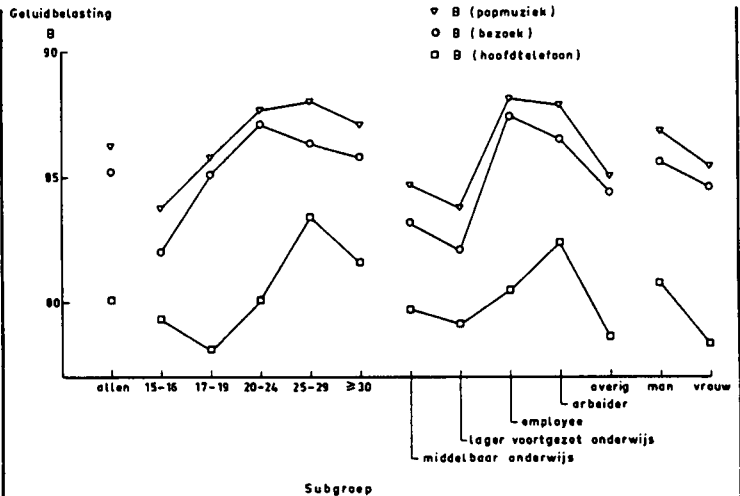
Vrouwen hebben een iets beter gehoor dan mannen.

Gehoorgeverlies aan het rechteroor is gemiddeld minder dan aan het linkeroor.

Van de antwoorden op de vragen naar het bezoeken van popmuziekgelegenheden en het gebruik van hoofdtelefoons volgt hier slechts een kort overzicht.

Bij de onderzochte groep blijkt er geen enkel verband te bestaan tussen het gebruiken van hoofdtelefoons en het bezoeken van popmuziekgelegenheden. Evenmin is er een relatie tussen het aantal jaren dat men hoofdtelefoons gebruikt en de frequentie waarmee dit in de periode van het onderzoek gebeurde. Gemiddeld is het aantal uren dat men met hoofdtelefoons luistert bijna drie per week en het aantal jaren dat men met hoofdtelefoons luistert is gemiddeld bijna vier. Het aantal malen dat men gedurende een bepaalde tijd (bijvoorbeeld een maand) een popmuziekgelegenheid bezoekt neemt af naarmate het aantal jaren dat men dit doet toeneemt (van ruim viermaal per maand in de beginperiode tot bijna driemaal per maand als men meer dan tien jaar popmuziekgelegenheden bezoekt). Ook al is deze afnemende statistisch significant, toch is het een opvallend resultaat dat de bezoekfrequentie na een periode van tien jaar nog zo hoog is.

Uit de cijfers betreffende de duur en de mate van bezoek aan popmuziekgelegenheden en het gebruik van hoofdtelefoons is een schatting gemaakt van de geluidbelasting door popmuziek. Deze geluidbelasting is berekend volgens een bepaald model en het resultaat is – geluidenergetisch gezien – te vergelijken met een beroepsmatige expositie gedurende elke werkdag, afgezien van vakanties, over de duur van één jaar. Het resultaat voor bepaalde deelgroepen en voor de gehele groep is gegeven in tabel 2. In de eerste kolom is allereerst te zien dat de geluidbelasting van de gehele groep door het bezoeken van popmuziekgelegenheden 85 dB(A) is, dat wil zeggen dat alle bezoeken aan popmuziekgelegenheden gedurende alle jaren dat men deze heeft bezocht een geluidbelasting heeft veroorzaakt die (geluidenergetisch gezien) even groot is als een beroepsmatige expositie gedurende één jaar aan een geluidniveau



Figuur 3: De onderzochte geluidbelastingen, uitgedrukt in het equivalente geluidniveau gerelateerd aan een beroepsmatige lawaai-belasting gedurende één arbeidsjaar, voor de gehele groep en voor een aantal deelgroepen

van 85 dB(A) gedurende de achtjarige werkdag. De gemiddelde duur van het bezoeken van popmuziekgelegenheden was ruim vijf jaar en de gemiddelde bezoekfrequentie was bijna 3,5-maal per maand. In figuur 3 is tabel 2 grafisch weergegeven.

Uit de tabel blijkt tevens dat de geluidbelasting vanwege het bezoeken van popmuziekgelegenheden zo'n 5 dB(A) hoger ligt dan die vanwege het gebruiken van hoofdtelefoons. Toch moet deze laatste factor niet verwaarloosd worden, omdat deze belasting de totale belasting door popmuziek doet toenemen; voor de onderzochte groep bijvoorbeeld van 85 tot 86 dB(A).

De meest belaste deelgroepen door popmuziek blijken de 20- tot 29-jarigen, de employé's en de arbeiders te zijn. Lagere belastingen zijn geconstateerd bij de nog jongere leeftijdsgroepen tot 20 jaar en bij de schoolgangers. Wellicht is het laatste er de oorzaak van dat er tot nu

toe geen gehoorschade door popmuziek geconstateerd is, omdat de tot nu toe onderzochte groepen, zoals de LTS-leerlingen uit het oriënterend onderzoek, (vrijwel) uitsluitend jongeren en/of schoolgangers/studenten zijn geweest. Het gevonden leeftijds-effect is begrijpelijk, omdat de meer dan 30-jarigen hun jeugd hebben doorgebracht vóór het popmuziek-tijdperk en de hogere totale geluidbelasting bij de 20- tot 30-jarigen dan die van de minder dan 20-jarigen wordt veroorzaakt door de omstandigheid dat de oudere leeftijdsgroep veel meer jaren de gelegenheid heeft gehad om de popmuziek mee te maken.

Het onderzoek geeft dus aan dat verder onderzoek naar de invloed van popmuziek op de gehoorschermpte het beste zou kunnen plaatsvinden bij groepen 20- tot 30-jarige employé's of arbeiders. Aangezien er op de arbeidsplaats van de arbeiders een grote verscheidenheid aan lawaai-exposities optreedt, die een grote variatie in mogelijke gehoorgeverlies door expositie aan lawaai teweegbrengt, is nader onderzoek bij deze groepen werknemers naar mogelijke effecten op de gehoorschermpte door popmuziek een zeer gecompliceerde en daardoor arbeidsintensieve zaak. Verder onderzoek naar mogelijke effecten op de gehoorschermpte door expositie aan popmuziek is dan ook te verrichten bij 20- tot 29-jarige employé's. Een ander positief gegeven is daarbij dat de kans bij 20- tot 29-jarigen en bij employé's om personen te treffen die popmuziekgelegenheden bezoeken en/of door middel van hoofdtelefoons naar popmuziek luisteren relatief groot is ten opzichte van het landelijke gemiddelde. Aangezien ook de trefkans in het westen van Nederland en bij personen werkzaam bij de overheid, banken en overige dienstverlenende instanties relatief hoog is, bleek nader onderzoek geïndiceerd bij een groep 20- tot 29-jarige employé's die in het westen van Nederland bij de overheid werkzaam zijn.

Tabel 2: Geluidbelasting door popmuziek, in vergelijking tot een beroepsmatige geluidexpositie gedurende één jaar, waarbij de expositie gedurende de gehele werkdag constant is (geluidbelasting in dB(A))

Omschrijving deelgroep	Geluidbelasting door bezoek aan popgelegenheden	Geluidbelasting door hoofdtelefoons	Totale geluidbelasting door bezoek en hoofdtelefoons
Gehele groep	85	80	86
15-16-jarigen	82	79	84
17-19-jarigen	85	78	86
20-24-jarigen	87	80	88
24-29-jarigen	86	83	88
Meer dan 30 jarigen	86	82	87
Middelbaar onderwijs volgend	83	80	85
Lager beroepsonderwijs volgend	82	79	84
Employé's	87	80	88
Arbeiders	86	82	88
Overige werkenden	84	79	85
Mannen	86	81	87
Vrouwen	85	78	85

Vervolgonderzoek

Als onderzoekpopulatie is gekozen voor 20- tot 30-jarige employé's, werkzaam bij het Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne te Leidschendam. Alle 20- tot 30-jarigen werkzaam bij genoemd Ministerie zijn uitgenodigd om aan het onderzoek deel te nemen. Er werd van elke deelnemer een audiogram opgenomen en er werd een serie vragen gesteld. Het afnemen van de vragenlijst geschiedde mondeling en duurde 30 tot 45 minuten per persoon.

In totaal zijn de gegevens van 227 personen bewerkt. Bij 23 personen bleek uit de antwoorden op de vragen dat andere oorzaken dan popmuziek aanwezig waren voor mogelijke gehoorschade. De gegevens van deze 23 personen zijn buiten beschouwing gelaten bij de beantwoording van de vraag of expositie aan popmuziek gehoorschade veroorzaakt heeft. Voor de beantwoording van genoemde vraag waren derhalve gegevens van 204 personen beschikbaar. Deze personen zijn in deelgroepen ingedeeld volgens het geschatte totaal aantal bezoeken dat ze in hun gehele leven hadden gebracht aan gelegenheden waar popmuziek ten gehore wordt gebracht, zoals discotheken, drive-in-shows en bij popconcerten. Het bleek dat slechts 16 van de 204 personen nog nooit een popmuziekgelegenheid hadden bezocht en dat 45 van de 204 personen (22%) in totaal meer dan 400 bezoeken hadden afgelegd, waarvan 8 (4%) zelfs meer dan 800 bezoeken.

De geluidbelasting van de onderzochte groep ten gevolge van expositie aan popmuziek in muziekgelegenheden bleek naar schatting ruim 89 dB(A) te zijn, dus iets hoger dan op grond van de tweede fase van het hiervoor beschreven onderzoek verwacht mocht worden voor een zeer zwaar belaste groep. Er kan dan ook gesteld worden dat de selectie van de onderzochte groep geheel aan de verwachtingen beantwoordt heeft.

Bijna 30% van de onderzochte groep luistert thuis en/of bij vrienden door hoofdtelefoons naar popmuziek. Het aantal uren dat de luisteraars hoofdtelefoons gebruiken/gebruikten is gemiddeld ruim één uur per week en de totale luisterperiode is gemiddeld 4,5 jaar. Uit de vergelijking van de gehoorverliezen van de gebruikers van hoofdtelefoons met die van de niet-gebruikers kwam naar voren dat de expositie aan popmuziek door hoofdtelefoons bij de onderzochte groep geen invloed heeft gehad op het gehoorverlies.

Ruim één derde van de personen was ten tijde van het onderzoek reeds opgehouden met het bezoeken van popmuziekaangelegenheden en bijna tweederde bezocht nog steeds popmuziekgelegenheden. Het gehoorverlies van hen die nog steeds discotheken en dergelijke bezoeken is vergeleken met het gehoorverlies van degenen die daarmee gestopt zijn. Bij geen enkele deelgroep en bij geen enkele frequentie is een aantoonbaar verschil gebleken. Kennelijk is er bij de huidige bezoekers geen sprake van een tijdelijk gehoorverlies door popmuziek ten tijde



Veel bezoekers aan discotheken weten uit ervaring dat er kort na een bezoek aan een dergelijke gelegenheid een dof gevoel in de oren overblijft. (copyright ABC)

van het opnemen van hun audiogram. Dit opnemen geschiedt in elk geval niet eerder dan ten minste één nacht na het bezoek aan dergelijke gelegenheden.

Een eventueel tijdelijk gehoorverlies heeft dan kennelijk voldoende tijd gehad om te herstellen. Alvorens de vraag te beantwoorden of popmuziek de gehoorscherpheid verslechtert, komen enkele andere onderzoekresultaten aan de orde. Vrouwen hebben een iets beter gehoor dan mannen van dezelfde leeftijdscategorie (20-30 jaar). Alleen bij 4000 Hz is er sprake van een aantoonbaar verschil (van ruim 2 dB). Dit fenomeen is overigens al eerder in de literatuur beschreven. Tevens kon worden vastgesteld dat het gehoorverlies aan het rechteroor gemiddeld ruim 2 dB minder is dan dat aan het linkeroor.

Een verschil tussen linker- en rechteroor treedt op bij alle frequenties en is het grootst bij 500 en 6000 Hz (3,9 en 3,2 dB). Gezien dit verschil, is bij de analyses uitgegaan van het gemiddelde gehoorverlies aan beide oren.

Volgens de theorie dat roken vaatvernauwing teweegbrengt en dientengevolge de doorbloeding van het gehoor belemmert, zou het mogelijk kunnen zijn dat roken invloed heeft op de gehoorscherpheid. Inderdaad blijkt er een aantoonbaar verschil in de gehoorverliezen bij 4000 en 6000 Hz van ruim 2 dB en ruim 3 dB tussen de rokers en de niet-rokers.

Van de 204 onderzochte personen hebben er 66 ooit knallend vuurwerk (rotjes e.d.) afgestoken of er tijdens het afsteken vlakbij gestaan.

Kan het volume wat minder?

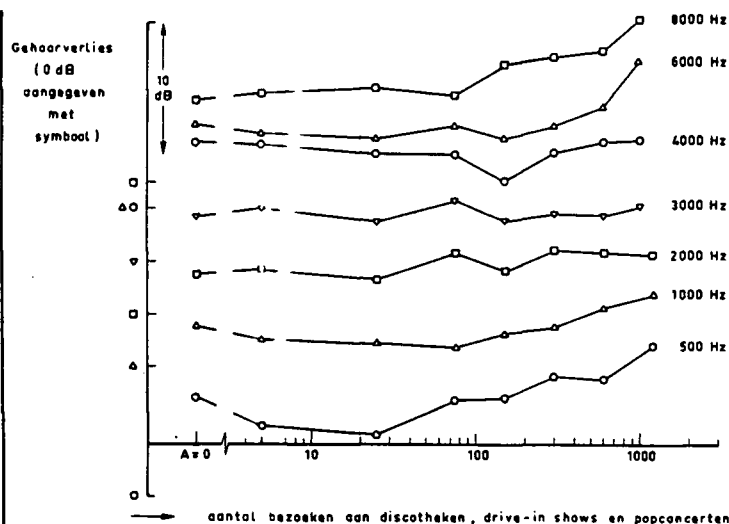
Wat zeg je?

Of 't wat zachter kan.

Oh.



BIJLAGE I2



Figuur 4: De gehoorverliezen als functie van het aantal bezoeken aan discotheken, drive-in-shows en popconcerten

Er bestaat een aantoonbaar verschil in de gehoorverliezen tussen rokers en niet-rokers.

Er bleken aantoonbare verschillen in de gehoorverliezen te zijn van 1,5, 3,2 en 5,2 dB respectievelijk bij 4000, 6000 en 8000 Hz, tussen degenen die wel en degenen die geen vuurwerk hadden afgestoken of er dichtbij hadden gestaan.

De vraag of het bezoeken van popmuziekgelegenheden de gehoorscherpheid verslechtert, dient bevestigend beantwoord te worden. Bij een aantal gehoorverliesfrequenties blijkt er een toename van het gehoorverlies als het totaal aantal bezoeken aan popmuziekgelegenheden toeneemt. Bij vier frequenties treden er aantoonbare effecten op: 500, 1000, 6000 en 8000 Hz. In figuur 4 zijn de gemiddelde gehoorverliezen van de deelgroepen voor de onderzochte frequenties uitgezet. In tabel 3 zijn de resultaten die significante verschillen tonen in getalwaarde opgenomen. Ook is een analyse van de spreiding in de gehoorverliezen gemaakt.

Er is sprake van een tendens dat naarmate het aantal bezoeken toeneemt ook de spreiding in de gehoorverliezen enigszins toeneemt. Deze tendens kan echter niet statistisch aangetoond worden.

Uit tabel 3 kan geconcludeerd worden, en dat is statistisch ook aangetoond, dat personen die vaak popmuziekgelegenheden bezoeken een wat groter gehoorverlies hebben dan personen die dat niet of minder vaak doen. Opvallend is daarbij dat er geen enkel effect op de gehoorscherpheid bleek te bestaan bij 2000, 3000 en 4000 Hz. Bij beroepsmatige expositie aan lawaai blijken de gehoorverliezen veelal na een aantal expositiejaren bij 4000 Hz het grootst te zijn. Dit effect bij 4000 Hz kon bij de beschouwde groep in het geheel niet worden aangetoond. Kennelijk liggen er bij expositie aan popmuziek andere relaties en andere mechanismen ten grondslag aan het ontstaan van gehoor-

verlies dan bij beroepsmatige dagelijkse expositie het geval is. De geconstateerde gehoorverliezen bij de hogere frequenties 6000 en 8000 Hz doen denken aan het fenomeen ouderdomsgehoorverlies/presbycusis/sociocusis. Dit is het verschijnsel dat de gehoorscherpheid afneemt met het vorderen der levensjaren. Deze gehoorscherptheidsvermindering treedt allereerst op in het gebied van de hoge tonen (boven 4000 Hz) en naarmate men ouder wordt treden de gehoorverliezen ook op bij de lagere frequenties, terwijl de gehoorverliezen in het gebied der hoge tonen dan nog veel groter worden. De toename van het gehoorverlies bij de deelgroep die zeer vaak popmuziekgelegenheden bezoekt (meer dan 800-maal) is bij 6000 en 8000 Hz ongeveer even groot als de toename van het (beginnende) ouderdomsgehoorverlies bij een vergelijking van 25-jarigen met 35-jarigen. Voor het gevonden resultaat bij 500 en 1000 Hz is het minder eenvoudig een fysiologische verklaring te geven.

Wat betreft de consequenties van de geconstateerde gehoorverliezen in het kader van de volksgezondheid worden de volgende kanttekeningen gemaakt. Allereerst de ons inziens gerechtvaardigde conclusie dat het met gehoorschade door popmuziek nogal meevalt. Zelfs bij exposities die oplopen tot in totaal zo'n 400-maal een bezoek aan popmuziekgelegenheden is het gemiddeld gehoorverlies toegenomen met niet meer dan 2,5 dB en dan nog alleen bij 500 en 8000 Hz. Bij zeer veel bezoeken (meer dan 800-maal) neemt het gehoorverlies gemiddeld toe met 3 à 6 dB (afhankelijk van de frequentie van het gehoorverlies). Dergelijke kleine gehoorverliezen worden door de betreffende personen in het leven van alledag zeker niet bemerkt. Deze waarden zijn van dezelfde orde van grootte als de variatie in de gehoordrempelwaarden van dag tot dag. Van groot belang daarbij is ook dat de spreiding in de gehoorverliezen niet toeneemt als het aantal bezoeken toeneemt. Een eventueel gehoorverlies door popmuziek treedt bij elke persoon uit een deelgroep in ongeveer gelijke mate op. Dit heeft tot gevolg dat voor een zeer grote gevoeligheid voor het ontstaan van gehoorschade door popmuziek niet zo gevreesd hoeft te worden. Daarmee wil niet gezegd zijn dat er niet bij een zeer klein percentage mensen een extreme gevoeligheid voor gehoorverlies zou kunnen bestaan. Het beschreven onderzoek geeft er echter geen aanleiding toe dit te veronderstellen. Ook is het fysiologisch gezien niet aannemelijk dat het gehoorverlies een progressief element bevat, zodat als de exposities gestopt zijn er toch op latere leeftijd meer gehoorverlies door popmuziek optreedt dan in dit onderzoek is aangetoond.

Ten slotte de volgende opmerkingen. In dit onderzoek is toevallig aan het licht gekomen dat zowel roken als het geluid door knallend vuurwerk tot gehoorverlies hebben bijgedragen. Het in dit onderzoek beschikbare materiaal leent zich ten aanzien van deze effecten niet voor een nadere analyse. Nader onderzoek naar deze effecten lijkt dringend gewenst. Daarbij

Tabel 3: Gemiddeld gehoorverlies (in dB) van deelgroepen, ingedeeld volgens aantal bezoeken aan popmuziekgelegenheden (bovenste deel van de tabel) en de toename van het gemiddelde gehoorverlies ten opzichte van de deelgroep met geen of weinig expositie aan popmuziek in gelegenheden (onderste deel van de tabel)

Aantal bezoeken	Omschrijving popmuziekexpositie	Aantal personen	Gemiddeld gehoorverlies bij			
			500 Hz	1000 Hz	6000 Hz	8000 Hz
minder dan 50	weinig of geen	58	5,9	2,3	5,4	6,3
50 tot 400	matig veel	101	8,5	2,6	6,0	8,7
meer dan 400	veel	45	9,6	4,7	8,4	10,4
meer dan 800	zeer veel	8	11,9	5,5	11,1	12,2
			Toename gemiddeld gehoorverlies			
			500 Hz	1000 Hz	6000 Hz	8000 Hz
50 tot 400	matig veel	101	2,6	0,3	0,6	2,4
meer dan 400	veel	45	3,7	2,4	3,0	4,1
meer dan 800	zeer veel	8	6,0	3,2	5,7	5,9

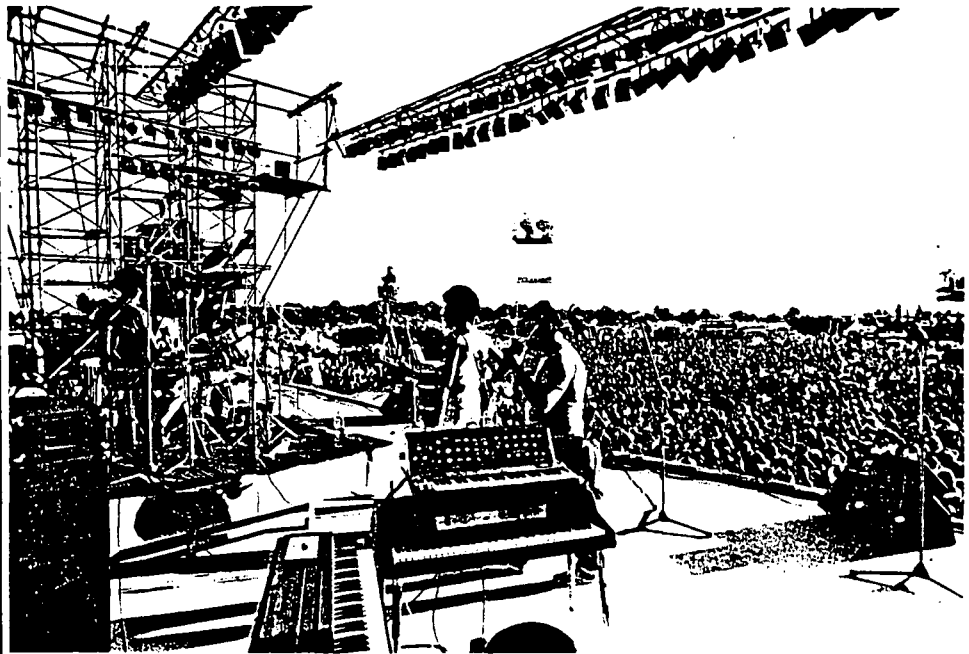
dient goed in het oog gehouden te worden dat de beschouwde groep niet geselecteerd is op veelvuldig roken en het veelvuldig afsteken van knallend vuurwerk. Niettemin blijken de geconstateerde effecten op de gehoorscherpthe van vergelijkbare grootte te zijn als de gehoorverliezen door expositie aan popmuziek bij een dienaangaande zwaar belaste groep. Bij een groep zware rokers of een groep die veelvuldig in verleden en heden knallend vuurwerk afsteekt zal een mogelijke gehoorschade wellicht veel groter zijn.

Anderzijds bleek het beluisteren van popmuziek door hoofdtelefoons bij de onderzochte groep geen gehoorverlies te hebben veroorzaakt. Deze conclusie is gebaseerd op een gemiddelde luisterfrequentie van één uur per week en een gemiddelde luisterperiode van 4,5 jaar. Het zou heel goed mogelijk kunnen zijn dat met een toenemend gebruik van hoofdtelefoons gehoorschade door het beluisteren van popmuziek via deze telefoons wel zou kunnen optreden.

Als afsluitende waarschuwing dient gesteld te worden dat het verkregen resultaat ten aanzien van popmuziek – weinig gehoorschade bij zeer veel bezoeken aan popmuziekgelegenheden en geen gehoorschade bij het gebruik van hoofdtelefoons – ook een tijdselement bevat. Zouden in de komende jaren het gebruik van hoofdtelefoons en de geluidsniveaus in popmuziekgelegenheden in sterke mate toenemen, dan is meer gehoorschade niet uit te sluiten. ●

LITERATUUR

[1] Passchier-Vermeer, W. De invloed van



Het equivalent geluidniveau tijdens popconcerten is 100 dB(A) (copyright ABC)

popmuziek op de gehoorscherpthe van jonge luisteraars. IMG-TNO Rapport B 350 (1976). Dit rapport is tevens uitgebracht in het kader van de Interdepartementale Commissie Geluidshinder onder nummer BG-HR-07-01 (januari 1977).

[2] Passchier-Vermeer, W. Populaire muziek: Luistergewoonten bij een steekproef uit de Neder-

landse bevolking. IMG-TNO Rapport B 424 (1979).

[3] Passchier-Vermeer, W. Popmuziek. Blijvende gehoorschade door expositie aan popmuziek? Een afdoend antwoord. IMG-TNO Rapport B 471 (1981).

Gehoorschade door popmuziek valt nogal mee.

BIJLAGE 13

Het Meten van de Nagalmtijd

Voor het meten van de nagalmtijd zijn nodig: een geluidbron voor het opwekken van geluid, een geluidniveaumeter met filter en een schrijver of rekenapparaat voor het vastleggen van het uitsterven van het geluid wanneer de bron wordt uitgeschakeld.

De geluidbron

De geluidbron moet voldoende luid zijn, vooral in grote ruimten of als het achtergrondlawaai hoog is. Een startpistool is een handige draagbare geluidbron, echter met grote nadelen. Door gebrek aan lage frequenties is de reproduceerbaarheid gering en bovendien wordt er door de korte duur van het geluid geen stabiel geluidniveau in de ruimte opgebouwd. Een veel betere geluidbron wordt gevormd door een luidspreker die een ruissignaal afgeeft, dat is opgesplitst in frequentiebanden. De eigen resonanties van de ruimte worden hiermee veel minder geëxciteerd dan met sinussignalen het geval is. "Witte ruis" is een willekeurig ruissignaal (dat wil zeggen alle frequenties van het spectrum zijn aanwezig met een willekeurige distributie van de amplitude) met een constant niveau over het gehele frequentiespectrum. "Roze ruis" is een ruissignaal dat met toenemende frequentie in niveau afneemt met 3 dB per oktaaf. Bij gebruik van filters met een constante procentuele bandbreedte zoals oktaaffilters, (dat wil zeggen de filterbreedte neemt toe met toenemende frequentie) wordt door middel van roze ruis in elk filter een gelijke energie verkregen. Als het ruissignaal in frequentiebanden door de luidspreker wordt weergegeven, wordt voor een gelijk versterkervermogen een hoger geluidniveau behaald dan met breedbandruis.

Vanwege achtergrondlawaai is het zelden mogelijk de volle 60 dB van het uitsterven van het geluid te meten. Meestal moet worden volstaan met 40 dB, 30 dB of zelfs 20 dB (te extrapoleren naar 60 dB). De werkelijk gemeten afname wordt dan opgegeven als bijvoorbeeld T_{60} , T_{30} , T_{20} .

Het meetgedeelte

Het meetgedeelte bestaat uit een microfoon, een meetversterker en een grafische niveauschrijver. Voor minder beïnvloeding door omgevingslawaai kan ook hier een bandfilter, overeenkomstig het filter in de geluidbron, in de meetketen worden aangebracht.

Een draagbare meetinstallatie bestaat uit een geluidniveaumeter met ingebouwde oktaaffilters of een geluidniveaumeter uitgerust met een oktaaffilterset, die kan worden aangesloten op een draagbare niveauschrijver.

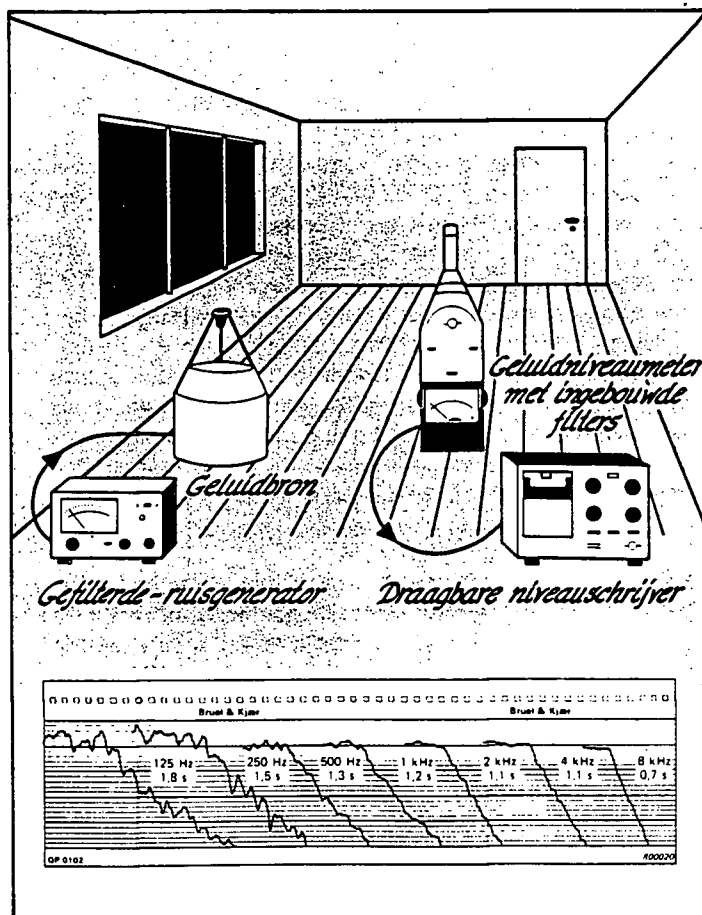
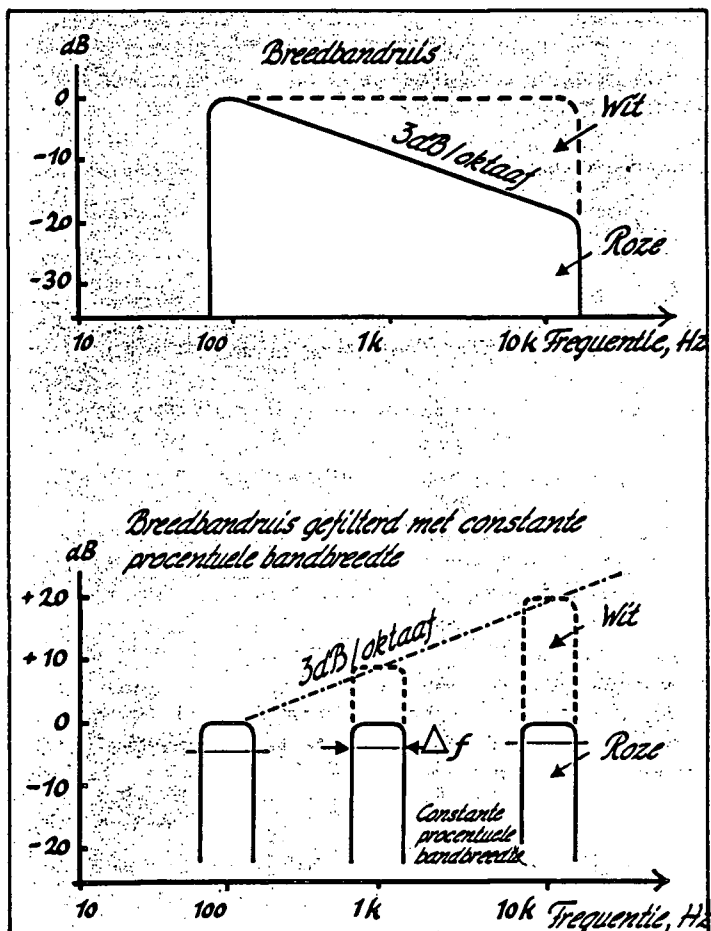
Vanwege het exponentieel uitsterven van de geluidenergie en de logaritmische registratie van de meter of niveauschrijver zal de nagalm als een rechte lijn op het registratiepapier komen te staan. De grilligheid van de curve bij lage frequenties is een gevolg van de ongelijke verdeling van kamerresonanties in dit frequentiegebied.

De plaatsing van bron en microfoon

Door kamerresonanties en echo's is de nagalmtijd in belangrijke mate afhankelijk van de plaats van de geluidbron en de meetmicrofoon. Soms ligt deze plaats voor de hand, zoals de sprekerstoel in een luisterzaal, maar meestal moet de bron in een hoek geplaatst worden om te voorkomen dat slechts enkele van de kamerresonanties worden aangestoten. In een hoek heeft iedere resonantie een druk-maximum.

Met de meetmicrofoon moet op een aantal verschillende plaatsen worden gemeten, vooral in grotere zalen waar de nagalmtijd van de plaats afhankelijk is. De meetwaarden kunnen door een van de volgende methodes per frequentieband worden gemiddeld:

- een microfoon op diverse meetpunten
- een aantal microfoons beurtelings afgetast door een meetpuntschakelaar
- een microfoon op een roterende arm



INHOUD

MUZIEK

Benodigdheden per proef of onderzoek

64

Bouwbeschrijvingen

66

Werkbeschrijvingen

70

BENODIGDHEDEN PER PROEF OF ONDERZOEK

benodigdheden

HOOFDSTUK 1

- pag. 8 stemvorken
 toongenerator
 stemvorken met fijne schrijfstift, lage en hoge toon
- pag. 9 oscilloscoop
- pag. 10 oscilloscoop, toongenerator + luidspreker
 dB-meter
 slinger, bekkens en stopwatch (geluidsnelheidsproef)
- pag. 11 stemvorken met klankkast
 toongenerator met luidspreker

HOOFDSTUK 2

- pag. 14 statiefmat., touw of nylondraad, gewichtjes
 luidspreker met toongenerator
- pag. 17 zie pag. 14 + licht stroboscoop
- pag. 18 toongenerator + luidspreker
 perspex buis + kurkvijlsel, thijm of mosterdzaadjes
 oscilloscoop + dB-meter, toongenerator + luidspreker
 waterkolom in perspex buis (zie bouwbeschrijving)
- pag. 19 oscilloscoop + cassette recorder met voorbespeeld bandje
 (tonen op diverse instrumenten)
- pag. 20 bandfilter (zie bouwbeschrijving), cassette recorder
 met voorbespeeld bandje, oscilloscoop

HOOFDSTUK 3

- pag. 30 toongenerator, luidsprekerbox (goede)
 (luidheid) voorbespeelde cassetteband of toongenerator
 goede luidspreker en een dB-meter
- pag. 31 toongenerator, luidsprekerbox, dB-meter
 2 stemvorken (dezelfde toon) + ruitertje en klankkasten
- pag. 32 drie toongeneratoren + luidsprekers
 of cassette recorder met voorbespeeld bandje
- pag. 34 voorbespeelde cassetteband, recorder en luidspreker
- pag. 35 voorbespeelde cassetteband, recorder en luidspreker
- pag. 36 idem pag. 34 en 35

BENODIGDHEDEN PER PROEF OF ONDERZOEK

benodigdheden

HOOFDSTUK 4

- pag. 41 dia/geluidsband
- pag. 42 idem pag. 41
- pag. 45 golfbak met trilapparaat
- pag. 46 portable geluidsbron en dB-meter
- dB-meter, toongenerator + luidspreker en absorberend materiaal
- pag. 49 modelkamer (zie bouwbeschrijving)
 mikrofoon + oscilloscoop (of dB-meter i.p.v. mikrofoon)
 toongenerator + luidspreker of metronoom of zelfbouw
 metronoom (zie bouwbeschrijving)
- pag. 51 toongenerator + luidspreker, schrijver + dB-meter
- modelkamer, toongenerator + luidspreker
 oscilloscoop + dB-meter
- pag. 52 toongenerator + luidspreker, dB-meter
 golfbak met trilapparaat
- pag. 53 voorbespeelde cassetteband, nagalm

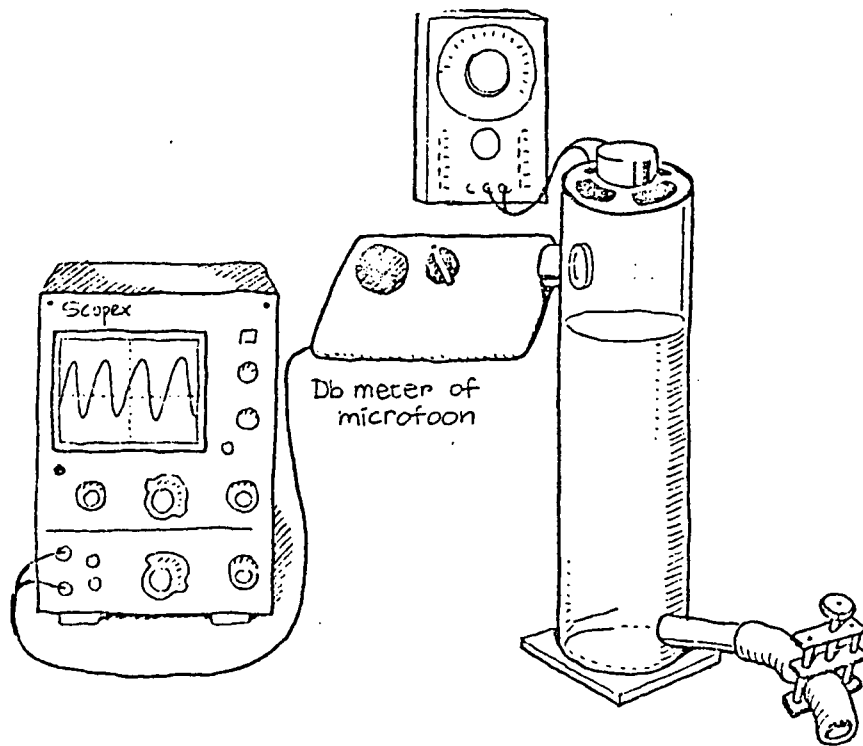
HOOFDSTUK 5

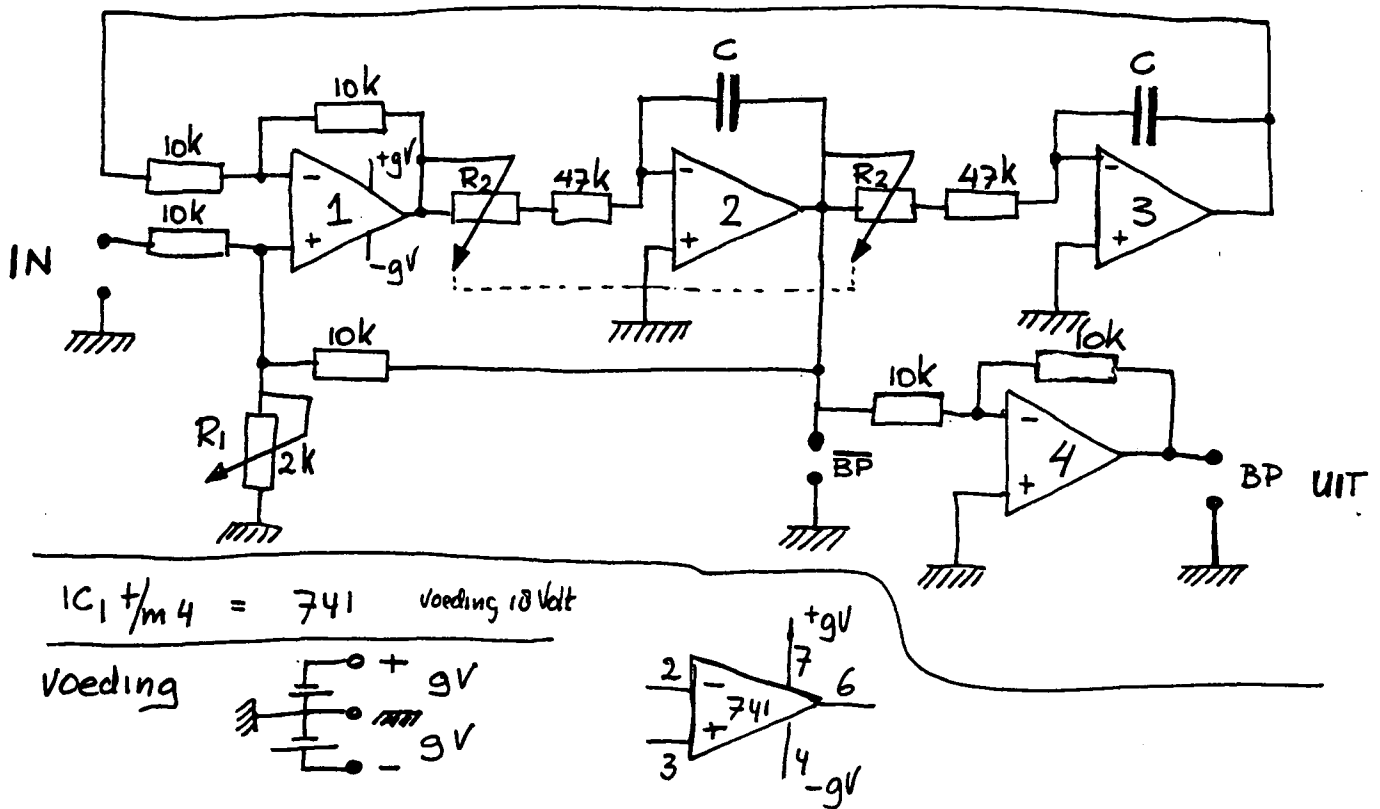
HOOFDSTUK 6

BOUWBESCHRIJVINGEN

Resonantiekolom

gemaakt van perspex 60 mm $\varnothing$
lang 500 mm



BandfilterOnderdelen: weerstanden

6 x 10 k Ω
 2 x 47 k Ω
 1 x 2 k Ω instel pot.
 1 x 1 m Ω stereo pot.

condensatoren

2 x 1000 pF

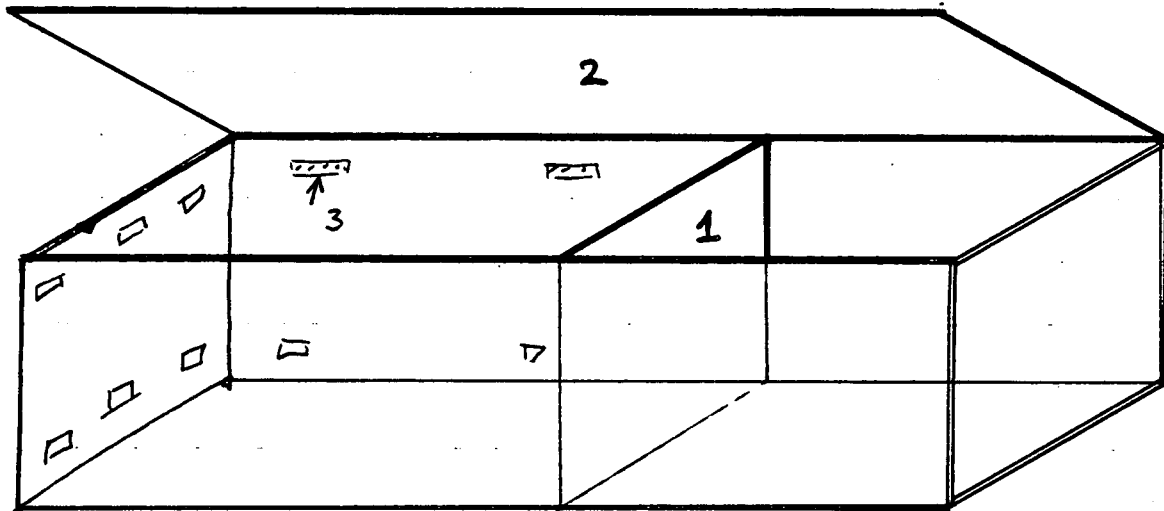
4 IC's 741 mini dip + voet

diversen

batterijen 2 x 9 Volt
 batterijsnoertjes 2 x

BOUWBESCHRIJVINGEN

Modelkamer nagalmtijd
30 x 40 x 100 cm multiplex



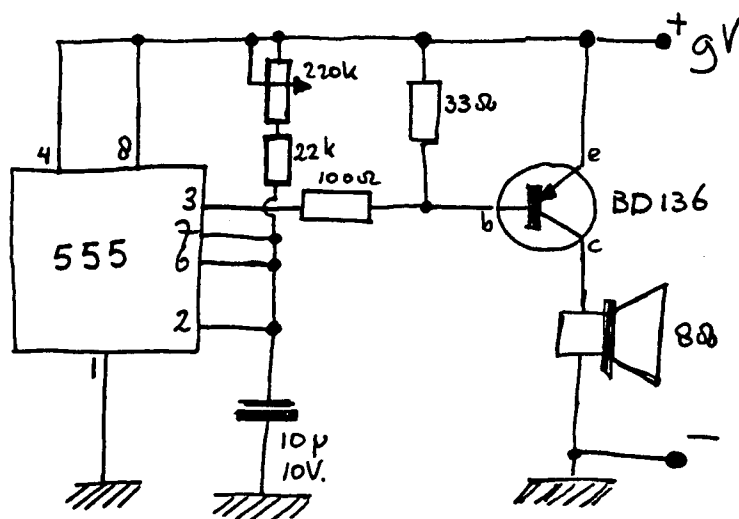
- 1 beweegbaar schot
- 2 deksel
- 3 kleefband voor het aanbrengen van 6 mm woltapijt met een rubberen onderlaag

Zelfbouwmetronoom

luidspreker en schema in kastje bouwen

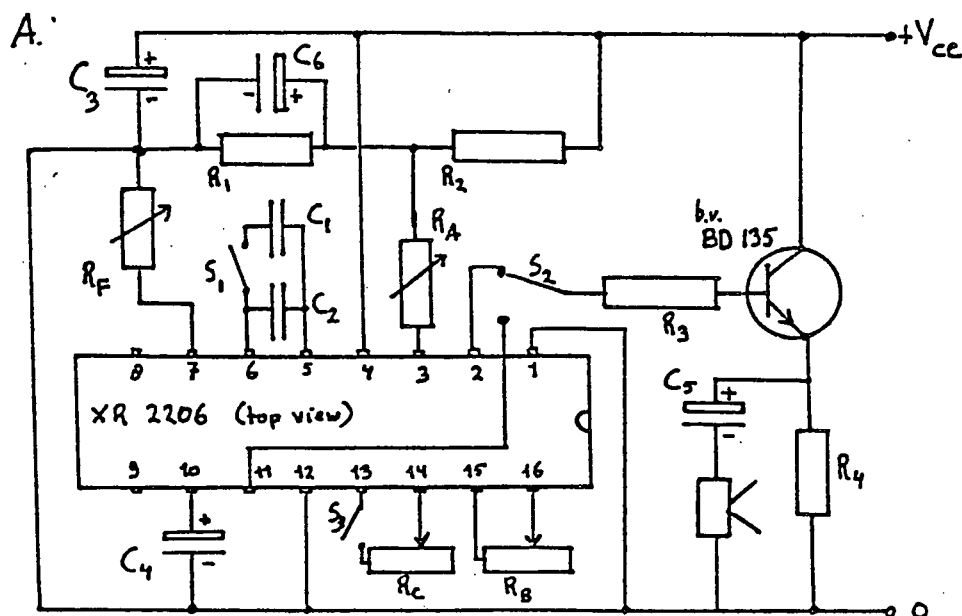
luidspreker bij voorkeur:

Philips AD 2296 T.



Een betere uitgangstrap verkrijgen we met een eenvoudige balansschakeling. Hieronder bij B is het schema getekend, met een dubbele voeding, waardoor ook de schakeling rondom de 2206 wat eenvoudiger wordt.

Schema A



$$R_1 = R_2 = 4700 \, \Omega$$

$$R_3 = 1.1 \text{ k}\Omega$$

$$R_A = 200 \, \Omega$$

$$R_s = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_D = 25 \text{ k}\Omega$$

$$R_0 = 500 \, \Omega$$

$$C_s = 500 \text{ nF}$$

$$C_0 = 5 \text{ nF}$$

$$C_{-} = C_{+} = 1 \text{ } \mu\text{F}$$

$C = 100 \mu F$

$C = 10 \text{ } \mu\text{F}$

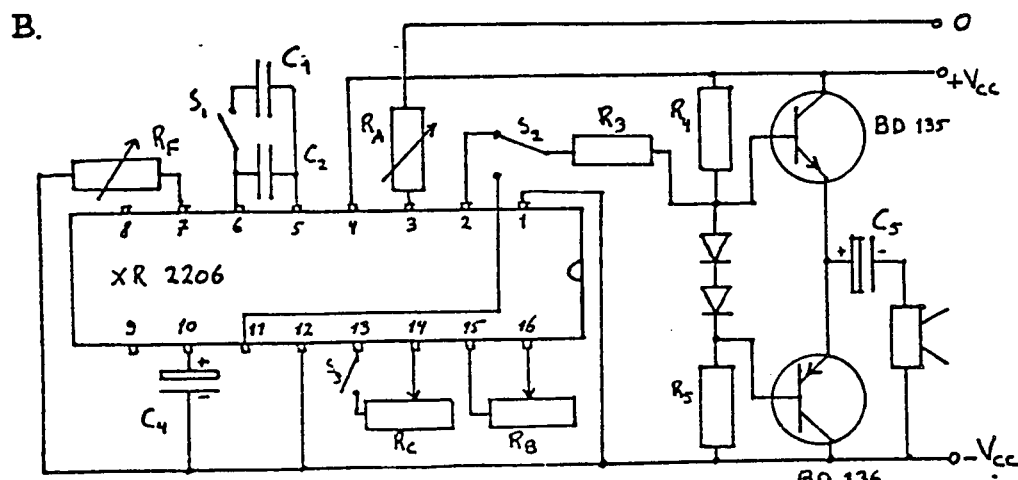
$$B = 100 \text{ kPa}$$

Schema B

Als bij A,

$$R_4 = R_5 = 10 \text{ k}\Omega$$

diodes= alle Si
typen bruikbaar.



WERKBESCHRIJVINGEN

Amplitudo A en frekwentie f zijn in te stellen met resp. de potentiometers R_A en R_F , het frekwentiebereik is te variëren met schakelaar S_1 , dus door een andere capaciteit tussen de pinnen 5 en 6 van het IC te schakelen. Met $C_1 + C_2 = C$ wordt de frekwentie:

$$f = 1/(R_F \cdot C)$$

De bij het schema aangegeven waarden zijn zodanig, dat met S_1 open het bereik ca. 2000-15.000 Hz. is, met S_1 dicht ca. 20-2000 Hz.

De potentiometers R_B en R_C dienen voor het instellen van de golfvorm. Met R_C kan men "op 't oog" een sinusvorm instellen, met een oscilloscoop. R_B vormt een fijnregeling hiervoor, gebruik hiervan heeft alleen zin als men een nauwkeuriger criterium heeft voor de sinusvorm, b.v. een distorsiemeter, Voor huis-, tuin-, keuken- en schoolgebruik kan men R_B eventueel weglaten.

De elco's C_3 , C_4 en C_6 worden geadviseerd, maar de schakeling kan ook werken zonder deze componenten. Bij "onverklaarbare" oscillaties e.d. zijn deze elco's wel nodig.

Met S_2 kiest men tussen blokgolf en sinus-driehoek.

Met S_3 open verkrijgt men de driehoek inplaats van de sinus.

De luidspreker moet bij schakeling A een impedantie hebben van minstens 25 Ω , in schakeling B kan dat wat lager zijn maar bij voorkeur niet lager dan 8 Ω .

Voor de voedingsspanning wordt in de documentatie van het IC 10 tot 26 Volt geadviseerd. Schakeling A blijkt ook bij 9 Volt nog te functioneren. De voordelen van schakeling B komen echter pas goed naar voren bij een voedingsspanning van 2 x 9 Volt, 2 x 15 Volt zou volgens de specificaties te veel zijn.

Bij gebruik van deze oscillator loopt men tegen enkele problemen aan in de leerlingen-instructie. Zo is de oscillator niet geijkt qua frekwentie en amplitude, de waarden op de frontplaat van het kastje zijn dus niet af te lezen, zoals in de instructie wordt gevraagd.

Men kan R_F van een pijlknop voorzien en een zelfgemaakte schaal hierachter plaatsen. Met de amplitude ligt het wat moeilijker, aangezien deze van de belasting (impedantie van de luidspreker) afhangt.

Een andere oplossing zou zijn de instructie zo aan te passen, dat de leerlingen zelf de noodzakelijke ijking van de generator als één van de eerste opdrachten uitvoeren.

I. de Bruijn

mei 1982.