

EEN NIEUWE ONTWERPMETHODE VOOR LUIDSPREKER OVERNAMEFILTERS

R.M. Aarts
Philips Research Laboratories
P.O. Box 80000, 5600 JA Eindhoven

A NEW METHOD FOR THE DESIGN OF LOUDSPEAKER CROSSOVER FILTERS

Summary: A new method is presented for the design and evaluation of loudspeaker crossover filters. The desired system characteristic can be prescribed by a (complex) acoustic transfer function rather than an electrical one only. It may be derived from conventional filters or based on a measured one from a reference (favourable) system.

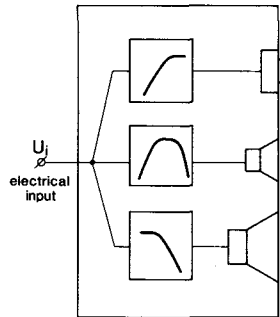
Double blind listening tests are performed to verify subjectively the similarity between the reference system and its experimental counterpart. The drivers of the experimental loudspeaker are preceded by digital filters, enabling the imitation of several different favourable loudspeakers. Multidimensional scaling techniques are applied to represent the results of the listening tests. These results affirm the strength of the design method.

1 INLEIDING

Een overnamefilter, dit is een elektrisch filter wat voorafgaat aan een luidspreker, zie figuur 1, speelt een belangrijke rol in de vorming van het timbre van een luidsprekerbox. De reden dat er doorgaans meer luidsprekers in een box nodig zijn is dat één luidspreker in een box niet het gehele audio frequentiebereik kan weergeven met het gewenste afstralgedrag; dit wordt nader toegelicht in de paragraaf 'bundeling van luidsprekers'. Het ontwerp van overnamefilters, soms ook wisselfilters genoemd, kan opgedeeld worden in drie methoden:

- De klassieke aanpak is dat voor het filter een keuze wordt gemaakt uit de bekende filter families zoals Butherworth etc.; of voor luidsprekers de zgn. Linkwitz-Riley filters [1].
- De tweede mogelijkheid is door middel van numerieke optimalisatie. Het filter wordt zodanig gemaakt dat de geluidsdruk van de totale box, gemeten op één plaats, voldoet aan een vooraf gegeven curve, deze is meestal (binnen de audio bandbreedte) frequentie-onafhankelijk.
- De derde methode, die het onderwerp is van dit artikel, gebruikt een bestaande- of hypothetische luidsprekerbox als referentie. De overnamefilters worden nu zodanig

berekend dat de luidsprekerbox zoveel mogelijk (akoestisch) gelijk is aan de referentie voor elke luisterpositie. Door dit laatste wijkt deze methode af van klassieke egalisatie. Door deze nieuwe methode kan het stralingsgedrag van een luidsprekerbox veranderd worden bij een gelijk blijvende geluidsdruk op één plaats gemeten. Aan de hand van twee gekozen referentiesystemen, zal deze ontwerpmethode getoetst worden door subjectieve luisterproeven met de methode van triadische vergelijkingen [2], waarna de resultaten door middel van multidimensionale schaling (MDS) [3] gepresenteerd worden.



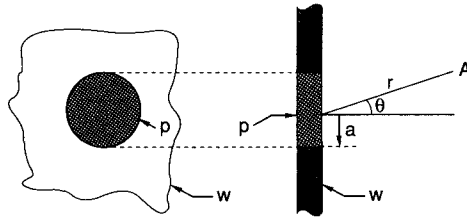
Figuur 1 3-weg luidsprekerbox, waarbij elke luidspreker voorafgegaan wordt door respectievelijk een hoogdoorlaat-, een banddoorlaat- en een laagdoorlaat filter.

1.1 Bundeling van luidsprekers

De berekening van het geluidsveld geproduceerd door een luidspreker is een gecompliceerde zaak; om toch een kwalitatief resultaat te krijgen is het gangbaar om het veld van een zuiger in een oneindig groot klankbord te berekenen. Van een harmonisch bewegende stijve zuiger in een oneindig groot (stijf) klankbord, zie figuur 2, kan de druk als volgt worden berekend. De zuiger, bewegend met snelheid $ue^{j\omega t}$ wordt opgedeeld in een aantal puntbronnen elk trillend in fase met de andere elementen. De druk in A (als verre veld benadering, d.w.z. $r \gg a$) is dan de som van druk van alle elementen, en wordt gegeven [4] door:

$$p(r,t) = j\omega\rho u \frac{a^2}{r} \left[\frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] e^{j\omega(t-r/c)}, \quad (1)$$

waarbij: a de straal van de zuiger, J_1 de eerste orde Bessel functie en $k = \omega/c$ het golfgetal. Zoals uit formule (1) blijkt gaat de zuiger voor hogere frequenties, zeg $ka > 1$ steeds meer van een eenvoudige puntbron afwijken. Voor luidsprekers is het gebruikelijk om dit gedrag uit te drukken in $Q(\omega)$ de richtingsafhankelijkheids factor, dit is de verhouding van de intensiteit van de complexe bron (bij een gegeven θ en r) en de



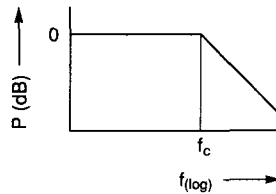
Figuur 2 Stijve zuiger (p) in een oneindig groot klankbord (w). Het meetpunt A is op afstand r en onder hoek θ t.o.v. het midden van de zuiger.

intensiteit van een puntbron als die puntbron hetzelfde totale akoestische vermogen zou afstralen als de complexe bron. Het totale akoestische vermogen wordt gegeven door:

$$P_w = \iint_S p^2 / \rho c \, dS \quad (2)$$

Met vergelijkingen (1) en (2) is het totale akoestisch vermogen uitgerekend en uitgezet in figuur 3. Uit dit figuur blijkt dat voor frequenties groter dan de afsnijfrequentie f_c het vermogen afneemt, waarbij geldt:

$$f_c = c / a \quad (3)$$



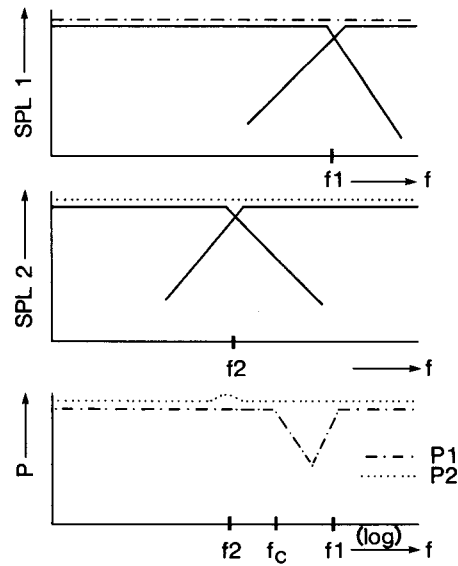
Figuur 3 Totaal akoestisch vermogen van een stijve zuiger (aangedreven met een constante versnelling), in een oneindig groot klankbord, f_c is de afsnijfrequentie.

De frequentie-afhankelijkheid van $Q(\omega)$, voor $\theta = 0$, is evenredig met de reciproke waarde van het akoestisch vermogen en is voor enkele ka waarden in Tabel 1 weergegeven als de richting afhankelijkheids index (DI), dit is $Q(\omega)$ in dB's. Ter vergelijking is ook opgenomen een stijve zuiger in een oneindig lange buis. Voor een ideale dipoolbron is de DI gelijk aan 4.8 dB en onafhankelijk van de frequentie.

Tabel 1 DI voor een zuiger in een klankbord en een zuiger in een buis.

ka	klankbord buis	
0.1	3 dB	0 dB
1	3.7	2.9
2	5.9	6.6
3	9.2	9.7
3.5	10.9	10.9

De vergelijking met de zuiger in een buis is gemaakt om de invloed van het klankbord (bij lage frequenties) te benadrukken. Een ideale dipoolbron heeft een frequentie-onafhankelijk afstraalgedrag vrij; volgens sommigen zou dit een ideale luidspreker zijn,



Figuur 4 Invloed van verschuiving van de overnamefrequentie, de afsnijfrequentie van de lage tonen luidspreker is bij f_c . a. SPL van 2-weg luidsprekerbox met overnamefrequentie f_1 (doorgetrokken curve) en van de totale geluidsdruk (streep-stip curve). b. idem bij overnamefrequentie f_2 en de totale geluidsdruk (gestippelde curve). c. Totaal akoestisch vermogen voor overnamefrequentie bij f_1 (streep-stip curve) en bij f_2 (gestippelde curve).

hoewel dat zeer discutabel is, de geluidsdruk is immers wel (luister)hoek-afhankelijk. Deze hoekafhankelijkheid wordt ook wel bundelen genoemd. De praktische consequentie voor luidsprekers is dat voor $f > f_c$, de geluidsdruk bij een waarnemer afhankelijk is van de frequentie en de positie t.o.v. de bron. Bij complexe signalen zoals muziek, zal dit bij verschillende luisterposities of zelfs bij hoofdbewegingen, leiden tot timbreverschillen. Dit is dan ook een reden om het frequentiegebied op te splitsen in meerdere banden, waarbij voor hogere frequenties steeds een kleinere straal a van de zuiger (luidspreker) gebruikt wordt. Dit opsplitsen in frequentiebanden wordt meestal elektrisch gedaan. De luidsprekersignalen worden gefilterd door overnamefilters. De frequentie waarbij beide luidsprekers een gelijke geluidsdruk veroorzaken is de overnamefrequentie. Uit het voorgaande blijkt, dat twee luidsprekerboxen met een identieke omkasting en luidsprekers, anders kunnen klinken door overname filters met verschillende overnamefrequenties te kiezen. Dit wordt symbolisch weergegeven door figuur 4. De streep-stip curve in figuur 4a stelt de geluidsdruk voor van box 1, die geleverd wordt door de som van een hoge- en lage tonen luidspreker, de overnamefrequentie is bij f_1 . De gestippelde curve in figuur 4b stelt de geluidsdruk voor van een tweede box, waarbij de overnamefrequentie gekozen is bij f_2 . Hoewel beide boxen op de as dezelfde (frequentie-onafhankelijke) geluidsdruk produceren, is het totaal afgestraalde vermogen, zoals geschetst in figuur 4c, van beide boxen verschillend. Bij de eerste box zal de lage tonen luidspreker voor $f > f_c$ gaan bundelen en omdat de hoge tonen luidspreker dan nog niet werkzaam is, immers $f_1 > f_c$, daalt het vermogen (streep-stip curve in fig. 4c) totdat de hoge tonen luidspreker vanaf f_1 werkzaam wordt. Bij de tweede box kan het vermogen (gestippelde curve in fig. 4c) frequentie-onafhankelijk gemaakt worden. In de praktijk treedt er (afhankelijk van de vorm van het overnamefilter) bij de overnamefrequentie f_2 een kleine verstoring op.

2 DOEL

Het doel is om het timbre van een experimentele luidsprekerbox gelijk te maken aan het timbre van een referentiesysteem. Als de akoestische overdrachtsfunctie van de j^{de} luidspreker gedefinieerd wordt door:

$$H_j^a(s, \underline{x}) = \frac{p_j(s, \underline{x})}{V_j^t(s)}, \quad (4)$$

waarbij p_j is de geluidsdruk op positie \underline{x} , V_j^t is de spanning op de aansluitklemmen van de j^{de} luidspreker en s is de complexe frequentie variabele. De elektrische overdrachtsfunctie van het j^{de} filter is gedefinieerd door

$$H_j^e(s) = \frac{V_j^t(s)}{V_{in}(s)}, \quad (5)$$

waarbij V_{in} is de klemspanning van de hele box. De totale overdrachtsfunctie van de j^{de} luidspreker wordt dan:

$$H_j^1(s, \underline{x}) = H_j^a(s) H_j^e(s) \quad (6)$$

Als nu de luidsprekers van de experimentele box elk voorafgegaan worden door een filter:

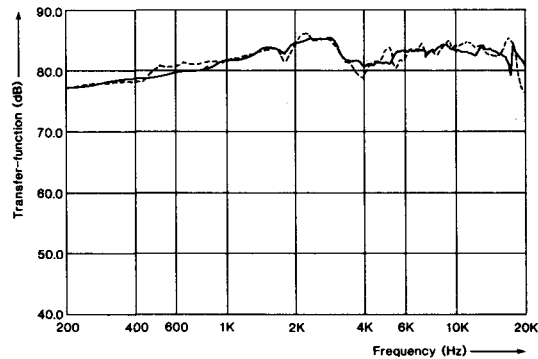
$$\hat{H}_j^e(s, \underline{x}) = \frac{H_j^1(s, \underline{x})}{\hat{H}_j^a(s, \underline{x})} \quad (7)$$

dan zullen beide luidsprekers, die van de referentiebox en van de experimentele box, hetzelfde klinken. Zoals uitdrukking (7) laat zien, hangt $\hat{H}_j^e(s)$ af van \underline{x} . Om deze afhankelijkheid te verwaarlozen wordt verondersteld dat plaats van de luidsprekers op het klankbord en hun formaat overeen komen met die van het referentiesysteem.

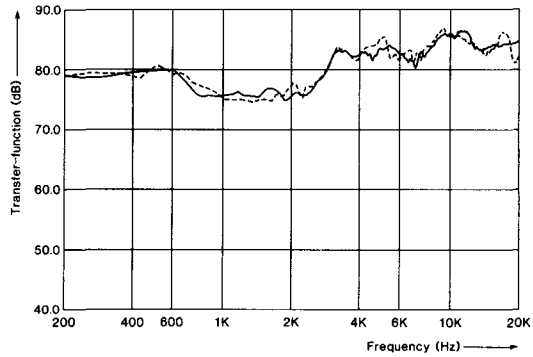
Met behulp van een optimalisatie procedure worden de coëfficiënten van een digitaal filter zo berekend dat de overdrachtfunctie van dat filter zo gelijk mogelijk is aan die van uitdrukking (7).

3 ONTWERP VOORBEELD

Om de praktische waarde van de methode te beproeven, zijn twee geheel verschillend klinkende luidsprekerboxen als referentiesysteem gekozen, van respectievelijk fabrikant A en B. Het verschil in timbre is te wijten aan een verschillende geluidsdruk gemeten op de akoestische as, maar ook door een verschillend stralingsgedrag. Door dit laatste wordt in een normale luisterruimte (t.g.v. reflecties) het timbre sterk beïnvloed.



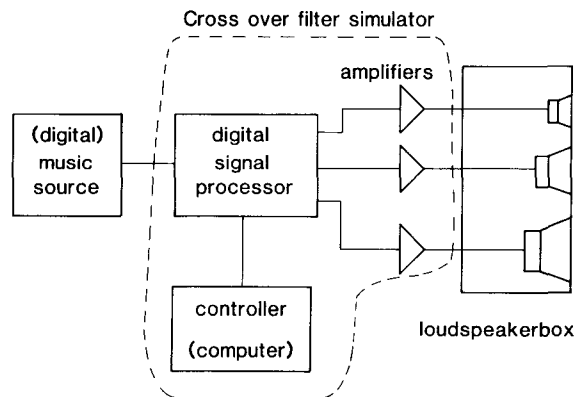
Figuur 5a SPL van box A (niet onderbroken curve) en van de experimentele box (gestreepte curve).



Figuur 5b SPL van box B (niet onderbroken curve) en van de experimentele box (gestreepte curve).

3.1 Echovrije ruimte

Van de boxen A en B zijn de geluidsdruck curves in een echovrije ruimte gemeten, waarvan het resultaat is te zien in figuur 5a (de doorgetrokken curve) voor systeem A en in figuur 5b die voor systeem B. Vervolgens zijn twee sets van filters coëfficiënten berekend (respectievelijk A_a en B_a) volgens de besproken methode. De coëfficiënten werden geladen in een digitale signaalprocessor die de kern vormde van de experimentele opstelling zoals figuur 6 laat zien [5]. Met behulp van deze opstelling zijn de geluidsdruck

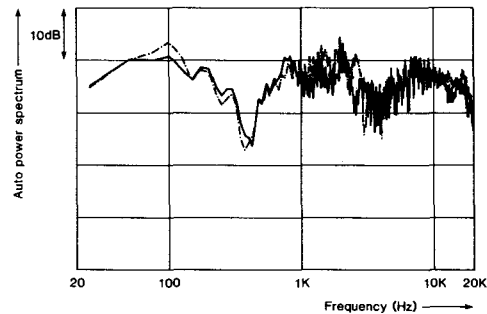


Figuur 6 Experimentele opstelling.

curves van de experimentele box gemeten; zowel met een filter om box A te imiteren, de gestreepte curve van figuur 5a, als die van box B, de gestreepte curve in figuur 5b. Zoals uit de figuren blijkt lijkt de experimentele box veel op de referentieboxen. Maar wat nog belangrijker is dat, zoals later zal blijken, deze gelijkens ook voor de corresponderende individuele luidsprekers geldt, zowel de fase als ook de magnitude.

3.2 Luisterruimte

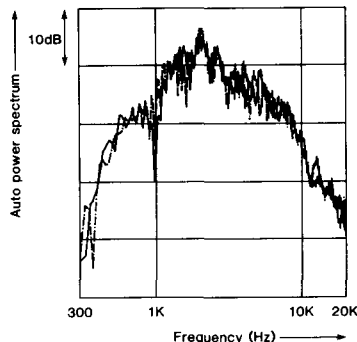
Zoals reeds genoemd is het stralingsgedrag van een luidsprekerbox erg belangrijk, boxen met eenzelfde geluidsdruk op de as in een echovrije ruimte kunnen anders klinken in een normale luisterruimte. Vanwege deze reden zijn in een luisterruimte ($V = 210 \text{ m}^3$ en bij 500 Hz : $T_{60} = 0.4 \text{ s}$) metingen en luisterproeven gedaan. Het signaalvermogen is voor box A en de experimentele box gemeten, waarvan het resultaat in figuur 7 te zien is. Vanwege het grote aantal modes in de kamer is, terwille van de figuur en niet bij de berekening, enige spatiele middeling toegepast door de meetmicrofoon op 3 m afstand van de box, te laten ronddraaien in een baan van 25 cm diameter. Om te benadrukken dat de individuele luidsprekers met hun corresponderende referenties een goede overeenkomst vertonen zijn van beide boxen alleen de midden tonen luidsprekers gemeten, waarvan het resultaat te zien is in figuur 8. Ook hieruit blijkt een goede overeenkomst; om na te gaan of ook het timbre goed overeenkomt zijn luisterproeven uitgevoerd.



Figuur 7 Geluidsdruk van box A (niet onderbroken curve) en van de experimentele box (streep-stip curve) gemeten in de luisterruimte (spatiele gemiddeld).

4 SUBJECTIEVE EVALUATIE

Een eenvoudige gelijkens test zou zijn om de experimentele box en zijn referentie naast elkaar te plaatsen en te luisteren of inderdaad het timbre gelijk is. Omdat duidelijk te herkennen is uit welke richting het geluid komt is dit geen 'blinde' luistertest. Om toch een vergelijking te kunnen maken zijn bandrecorder opnamen gemaakt van diverse



Figuur 8 Geluidsdruk van de middentoon luidspreker van box A (niet onderbroken curve) en van de experimentele box (streep-stip curve) gemeten in de luisterruimte (spatueel gemiddeld).

referentieboxen en de experimentele box, iedere keer voorzien van andere overnamefilters. Dit is gedaan zowel in een echovrije ruimte als in de genoemde luisterruimte.

Eerste experiment: echovrije kamer opname

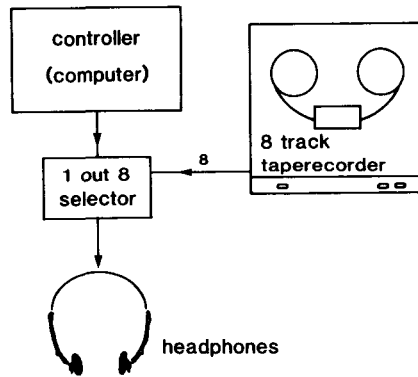
Vier passages (mono) muziek, van elk 2 minuten zijn opgenomen op spoor 1 van een acht sporen bandrecorder. Op de andere sporen zijn opnames gemaakt volgens tabel 2.

Tabel 2 Sporen toewijzing voor het eerste experiment.

spoor #	
1	direct van een Compact Disc speler
2	experimentele box met coëfficiënten set D_a
3	box C
2	experimentele box met coëfficiënten set A_a
5	box A
2	experimentele box met coëfficiënten set B_a
7	box B

Tijdens de opname was slechts een box in de kamer aanwezig, zodat het mogelijk was dat elke box dezelfde positie innam tijdens de opname. Om wat extra vergelijkingsmateriaal te hebben, was een derde referentie van fabrikaat C gebruikt. Ook was de experimentele box tijdens opname voor spoor 2, uitgerust met filters (coëfficiënt set D_a) die beoogden een hypothetisch ideale box te imiteren.

Met de opstelling volgens figuur 9, konden de diverse opnames worden weergegeven, zowel met diverse luidsprekerboxen als met hoofdtelefoons.



Figuur 9 Experimentele opstelling voor de luistertesten.

4.1 Doel

Dit experiment gebruikt gelijkenis oordelen van proefpersonen tussen muziekfragmenten opgenomen via referentieboxen en via de experimentele box. Multidimensionale schaling was gebruikt om te onderzoeken hoeveel dimensies er nodig waren om het psychologisch continuüm af te beelden en om de gemeten perceptuele verschillen te schalen.

4.2 Methode

De methode van triadische vergelijkingen [2] is gebruikt om een gelijkenis matrix te verkrijgen. De proefpersoon krijgt uit de set van stimuli drie stimuli aangeboden en moet beoordelen welk paar van de drie het minst gelijkend is, dit paar krijgt twee punten, het meest gelijkend paar nul punten en het resterende paar een punt. Dit wordt herhaald totdat alle paren een of meerdere keren gepresenteerd zijn. De resultaten worden verzameld tot een (ongelijkheids)matrix, die opgevat zou kunnen worden als een afstandtabel uit een agenda of atlas. Deze matrix kan dienen als invoer voor een computerprogramma, dat (in het geval van de afstandtabel) als uitvoer de oorspronkelijke onderlinge ligging van de steden geeft. Met de stimuli van tabel 2 zijn 14 gebalanceerde triades gevormd, zodat elke triade uniek was en elke stimulus luidspreker 2 keer gepresenteerd werd (voor details van de methode en van de proefopzet zie: [6]). Aan dit experiment namen 12 proefpersonen deel. De stimuli werden gepresenteerd via hoofdtelefoons onder diotische (beide oren hetzelfde signaal) condities.

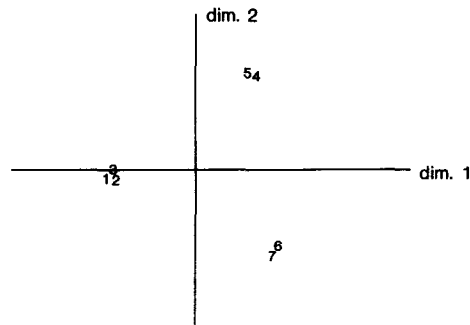
4.3 Resultaat

Het experiment leverde per proefpersoon een matrix op. De gelijkenis indices van alle proefpersonen werden samen genomen en gedeeld door het aantal keren dat een paar gepresenteerd was, waarvan het resultaat in tabel 3.

Tabel 3 Genormalizeerde (on)gelijkenis matrix voor alle proefpersonen.

1	-						
2	1.6	-					
3	1.9	1.6	-				
4	0.4	1.2	1.1	-			
5	1.2	1.1	0.8	1.9	-		
6	0.4	1.1	0.1	0.9	0.9	-	
7	0.4	1.0	0.6	0.3	0.6	2.0	-
	1	2	3	4	5	6	7

Met het multidimensionale schalingsprogramma KYST2a [3] is deze matrix geschaald. Het programma werd gebruikt in de niet metrische mode en normale Euclidische ruimte (*minkowski parameter = 2*). Het programma berekende, met een *Stress1* waarde van 0.008 in twee dimensies, een configuratie zoals figuur 10 laat zien. De *Stress1* waarden voor 1 en 3 dimensies waren respectievelijk 0.231 en 0.01. Deze waarden laten zien dat een twee dimensionale representatie de perceptuele ruimte goed beschrijft. De getallen in de figuur corresponderen met die uit tabel 2. Uit de figuur blijkt dat er drie groepjes zijn. De gelijkenis tussen referentie A en de experimentele box, en eveneens voor systeem B, is zeer groot. Het derde groepje laat zien dat de gelijkenis tussen de experimentele box, referentiesysteem C en het originele Compact Disc signaal groot is.



Figuur 10 Perceptuele configuratie, zie tabel 2 voor de legenda.

Tweede experiment

Tijdens het eerste experiment was er tijdens de bandopnames steeds één vaste microfoonpositie gebruikt. Om de invloed te onderzoeken van positie-afwijkingen van de microfoon t.o.v. de positie gebruikt om de filtercoëfficiënten te berekenen, zijn nieuwe bandopnames gemaakt. Hierbij zijn twee microfoonposities gebruikt, M2 en M3. Positie M2 was recht voor de box op een afstand van 4 m. Positie M3 was schuin voor de box op een afstand van 4 m met een hoek van 25°. De sporentoewijzing is volgens tabel 4. Zoals bij het eerste experiment is de methode van triadische vergelijkingen gebruikt. Aan dit experiment namen 15 proefpersonen deel.

Tabel 4 Sporentoewijzing voor het tweede experiment.

spoor #	
1	direct van een Compact Disc speler
2	systeem A pos. M2
3	experimentele box coëff. set A ₁ positie M2
4	systeem A pos. M3
5	experimentele box coëff. set A ₁ positie M3

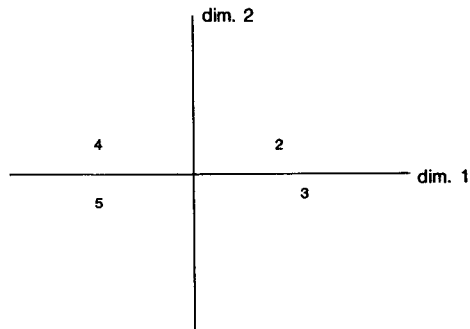
4.4 Resultaat

De gelijkens matrices verkregen van de proefpersonen waren samengenomen en genormaliseerd zoals in het vorige experiment. Het resultaat is volgens tabel 5.

Tabel 5 Genormalizeerde en gelijkensmatrix voor alle proefpersonen.

2	–				
3	1.9	–			
4	0.7	0.4	–		
5	0.6	0.5	1.8	–	
	2	3	4	5	

Het MDS programma was gebruikt, op dezelfde wijze als in het vorige experiment, het resultaat is volgens figuur 11. De getallen in de figuur corresponderen met de sporentoewijzing volgens tabel 4. De gelijkens van box A en de experimentele box, beiden op positie M2, is duidelijk; hetzelfde geldt voor positie M3. De perceptuele afstand tussen dezelfde box met de microfoon op M2 en M3 is veel groter dan de afstand tussen de verschillende boxen bij dezelfde microfoonpositie. We kunnen hieruit concluderen dat een afwijking van de luister(microfoon)positie de gelijkens niet beïnvloedt.



Figuur 11 Perceptuele configuratie, zie tabel 4 voor de legenda.

5 CONCLUSIES

Een nieuwe techniek voor het ontwerp van luidspreker overnamefilters is gepresenteerd. Met deze filters voorafgaand aan luidsprekers, is het mogelijk de akoestische responsie zowel recht voor de box, als hiervan afwijkend, gelijk te maken aan die van verschillende referentiesystemen. De gelijkenis geldt voor zowel de gehele box als voor de corresponderende individuele luidsprekers. Luisterexperimenten, gebruikmakend van triadische vergelijkingen, onderstrepen deze beweerde gelijkenis. De luisterexperimenten waren zo uitgevoerd dat storende invloeden zoveel mogelijk buitengesloten werden. Dit werd gedaan door niet direct naar de luidsprekerboxen te luisteren, maar naar bandrecorderopnamen van de boxen. De resultaten van de luistertesten zijn verwerkt met behulp van een multidimensionale schalingstechniek.

6 LITERATUUR

1. S.H. Linkwitz, Active Crossover Networks for Noncoincident Drivers, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 24: 1, (1976), pp. 2–8.
2. W.J.M. Levelt, J.P. van de Geer and R. Plomp, Triadic Comparisons of Musical Intervals, *The British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, Vol. 19, Part 2 (November 1966), pp. 163–179.
3. J.B. Kruskal, M. Wish, *Multidimensional Scaling, Quantitative Applications in the Social Sciences*, SAGE Publications Inc., (1978, 10th ed. 1983).
4. P.M. Morse, *Vibration and Sound*, McGraw-Hill Book Comp., New York, 1936. (reprinted by ASA: 2nd pr. 1983, pp. 326–328).
5. R.M. Aarts, A.J.M. Kaizer, Simulation of Loudspeaker Crossover Filters with a Digital Signal Processor, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 36: 3, (March 1988), pp. 115–121.
6. R.M. Aarts, A new Method for the Design of Crossover Filters, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 37: 6, (June 1989), pp. 445–454.