

MASTER

Aansturing van lineaire akoestische array's voor ultrasone transmissie tomografie

Mathijssen, R.W.M.

Award date:
1986

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

AFDELING DER ELEKTROTECHNIEK
TECHNISCHE HOGESCHOOL EINDHOVEN
Vakgroep Medische Elektrotechniek

Aansturing van
Lineaire Akoestische Array's
voor
Ultrasone Transmissie Tomografie

door: R.W.M. Mathijssen

Verslag van het afstudeerwerk, uitgevoerd
van september 1985 tot augustus 1986,
in opdracht van prof. dr. ir. J.E.W. Beneken,
onder leiding van drs. M. Stapper en ir. G. Sollie.

De afdeling der Elektrotechniek van de Technische Hogeschool
Eindhoven aanvaardt geen verantwoordelijkheid voor de inhoud
van stage- en afstudeerverslagen.

Summary

For a considerable time research of the medical applications of transmission tomography by means of ultrasound has been going on at the Medical Electrical Engineering Group of the Eindhoven University of Technology. The current experimental measuring system uses two single element transducers. Recently a feasibility study has been started to replace each of the single element transducers by a linear acoustical array .

First, this report looks at how to get well focussed ultrasonic sound beams by exciting eight array-elements at a time. Simulation programmes to compute and draw the shape of the sound beams have been written for an IBM personal computer.

Next, a way to perform a linear scan without losing the focussing is discussed. A circuit has been designed and built to provide the transmitter elements with pulses in such a way that eight neighbouring elements, shifting over the array, are excited. The ultrasonic beam, thus created, can shift along the array, making steps the size of one single array element.

Finally, the fabrication method by which our arrays are built, is discussed and a novel improved method is proposed.

Samenvatting

In de vakgroep Medische Elektrotechniek van de Technische Hogeschool Eindhoven wordt al geruime tijd onderzoek verricht naar de medische toepassingsmogelijkheden van ultrasone transmissie tomografie. In de huidige experimentele meetopstelling wordt daartoe gebruik gemaakt van twee verplaatsbare single-element transducers. Sinds kort is er onderzoek gaande naar de toepasbaarheid van array's ter vervanging van de single-element transducers.

In dit verslag wordt bekeken hoe - uitgaande van een apparaat waarmee acht array-elementen gefocuseerd aangestuurd kunnen worden - goed gefocuseerde geluidsbundels verkregen kunnen worden. Hiervoor zijn programma's geschreven voor een IBM-PC, waarmee de geluidsvelden berekend en op verschillende manieren getekend kunnen worden.

Verder is bekeken hoe, met behoud van focusering, een lineaire scan uitgevoerd kan worden. Hiervoor is een schakeling ontwikkeld en gebouwd, die de pulsen voor de zend-elementen zodanig over een array verdeelt, dat steeds 8 naast elkaar gelegen elementen, roulerend over het array, worden aangestuurd. De geluidsbundel die zo ontstaat kan dan met stappen ter grootte van één element-diameter langs het array worden verplaatst.

Tenslotte wordt de hier gebruikte fabricagemethode besproken, waarvolgens hier de arrays worden gemaakt, en wordt een verbeterde methode voorgesteld.

INHOUDSOPGAVE.

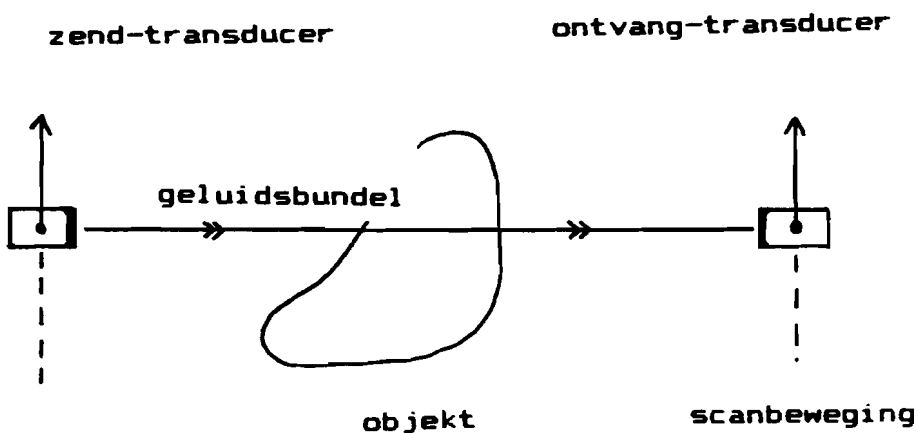
Summary	2
Samenvatting	3
Inhoudsopgave	4
1. Inleiding	5
2. Wat is Ultrageluid en wat zijn de medische toepassingen ervan?	8
2.1 Echografie	9
3. Transmissie tomografie	14
3.1 Wat is tomografie?	14
3.2 Beschrijving van de hier aanwezige meetopstelling.	16
4. Het lineair array	19
4.1 Het ultrasone veld : hoe is het te focuseren	19
4.2 Het scannen	22
4.3 Fabricage van een array	24
5. Het aansturen van het array	31
5.1 Metingen aan het ultrasone veld	31
5.2 Verschillende mogelijkheden	37
5.3 De ultrasone velden bij de verschillende mogelijkheden	40
6. De gebruikte elektronica	51
6.1 De zendelektronica	51
6.1.1 Elementschakelaars	55
6.1.2 Multiplexers	62
6.1.3 Andere mogelijke schakelingen	67
6.2 Stuursignalen	70
6.3 aanpassing van de elektronica voor verschillende aanstuurmogelijkheden	72
6.4 De ontvangstelektronica	74
7. Simulatieprogramma's	76
7.1 Theorie om velden te berekenen	76
7.1.1 De theorie volgens Duerinckx	76
7.1.2 De theorie volgens Peter Wardenier	78
7.1.3 Focuserings- en apodisatieparameters	79
7.2 Verklaring simulatie programma	83
7.3 De koppelfactor	85
8. Tekenprogramma's	87
8.1 3-D tekeningen	88
8.1.1 Hoe van 3D naar 2D tekeningen?	88
8.1.2 Het programma TEKEN3DD	92
8.2 hoogtekaarten	95
8.2.1 Hoe wordt een hoogtekaart getekend?	95
8.2.2 Het programma ISOBAR	98
9. Conclusies en aanbevelingen	101
Literatuurlijst	103
Appendix 1. De versterker in de meetkast	106
2. De GCV als functie van de ingangsspanning	108

1. Inleiding

In de projectgroep Afbeeldingstechnieken van de vakgroep Medische Elektrotechniek van de Technische Hogeschool Eindhoven, wordt onderzoek verricht naar de medische toepassingsmogelijkheden van ultrasone transmissie-tomografie. Met behulp van deze afbeeldingstechniek kan een beeld verkregen worden van de tweedimensionale verdeling van de voortplantingssnelheid of de frequentie-afhankelijke absorptie van ultrageluid, als functie van de plaats in een doorsnede door een object.

In de projectgroep Afbeeldingstechnieken is een experimentele meetopstelling ontwikkeld waarmee (kleine) testobjecten door middel van ultrasone looptijd- of absorptie-tomografie kunnen worden afgebeeld (in hoofdstuk 3 zal deze meetopstelling verder ter sprake komen).

In figuur 1.1 is te zien hoe in de meetopstelling een object door een geluidsbundel achtereenvolgens wordt afgetast. Door de zend-transducer wordt, volgens het piëzo-elektrisch principe, een korte ultrageluidspuls opgewekt, die volgens de aangegeven baan door het object loopt en bij de ontvangst-transducer aankomt. De looptijd en gemiddelde frequentie van deze puls bevatten relevante informatie over de geluidssnelheid en de absorptie langs dit traject en worden daarom gemeten en opgeslagen. Op volgende tijdstippen worden op dezelfde manier parallel aan dit traject gelegen banen doorstraald. Deze manier van aftasten wordt lineaire scanning genoemd.

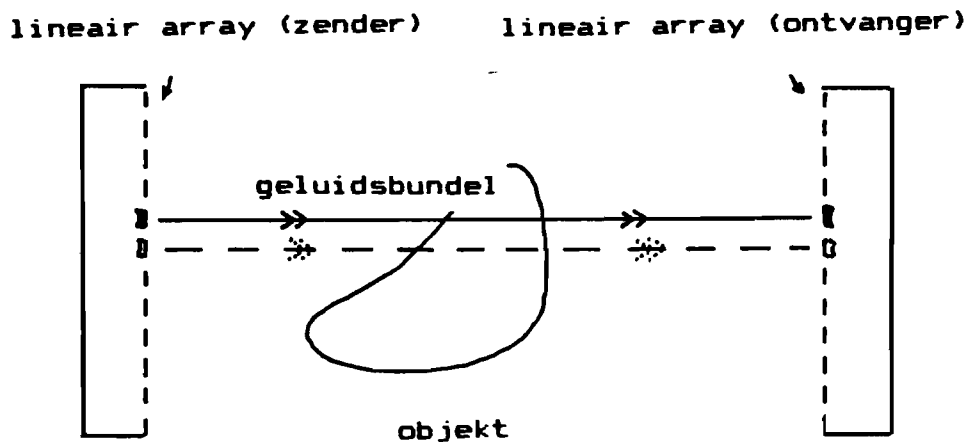


Figuur 1.1

In de bestaande experimentele meetopstelling voor ultrasone tomografie gebeurt de lineaire scanning, zoals getekend in figuur 1.1, met behulp van twee mechanisch voortbewogen single element transducers. De belangrijkste nadelen van dit mechanische systeem zijn:

- o mechanische constructieproblemen,
- o lage scansnelheid,
- o slechte bundelvorm.

Peter Wardenier [17] heeft onderzoek gedaan naar de mogelijke voordelen die een lineair akoestisch array kan bieden. Een lineair akoestisch array bestaat uit een groot aantal (100 tot 200) onafhankelijk aanstuurbare elementen, die op regelmatige tussenafstanden langs een rechte lijn zijn opgesteld. Door twee tegenover elkaar opgestelde arrays te gebruiken, kan het mechanische systeem uit figuur 1.1 vervangen worden door een elektronisch scansysteem, getekend in figuur 1.2



Figuur 1.2

In de in figuur 1.2 getekende situatie worden de constructieproblemen van het mechanische systeem voor het grootste deel vermeden, doordat het lineair scannen gebeurt door het elektronische selecteren van de juiste array-elementen. Dit brengt wel een extra hoeveelheid elektronica met zich mee. De

maximaal haalbare scansnelheid ligt echter wel hoger dan die van het mechanische systeem uit figuur 1.1. Als derde nadeel van het bestaande systeem werd de slechte bundelvorm, opgewekt door de zend-transducer, genoemd. In tegenstelling tot de in figuur 1.1 getekende (oneindig) dunne geluidsbundel, wekt een single element transducer een uitwaaiierende bundel op, waardoor de resolutie van het meetsysteem benadeeld wordt.

Peter Wardenier [17] heeft tijdens zijn afstudeerwerk bekeken, of het mogelijk is de bundelvorm te optimaliseren (dat is, de bundel zo smal mogelijk te maken door de mogelijkheden van een lineair akoestisch array te benutten). Hiertoe heeft hij de theorie beschreven, die nodig is om te rekenen aan het akoestisch veld van een lineair array. Verder heeft hij een apparaat gebouwd, waarmee een vaste groep van acht array-elementen zodanig aangestuurd kan worden, dat de uitgezonden geluidsbundel gefocusseerd kan worden.

In dit verslag wordt eerst bekeken hoe, uitgaande van de bestaande situatie (zoals deze na het afstuderen van Peter Wardenier was), het elektronisch scannen (met behoud van focuseren) gerealiseerd kan worden. In paragraaf 4.2 en hoofdstuk 6 komt het scannen en de elektronica die daarvoor nodig is aan de orde.

Metingen aan het ultrasone veld (die na de bouw van de scan-elektronica werden verricht) lieten weinig effect van het focuseren zien, bij het gebruik van acht elementen om te focuseren. Er is daarom (in hoofdstuk 5) bekeken hoe een geluidsbundel beter gefocusseerd kan worden. (In hoofdstuk 7 en 8 komen de programma's ter sprake waarmee de berekeningen zijn uitgevoerd en de velden zijn getekend).

Doordat er zich verder problemen voordeden met de bestaande arrays, is bekeken of de huidige fabricagemethode verbeterd kan worden. Hiervoor zijn in paragraaf 4.3 een aantal aanwijzingen gegeven.

Tenslotte staan in hoofdstuk 9 een aantal conclusies en aanbevelingen, naar aanleiding van dit afstudeerwerk.

2. Wat is Ultrageluid en wat zijn de medische toepassingen ervan?

Ultrageluid is geluid met een zo hoge frequentie, dat een mens het niet meer kan horen. In zijn algemeenheid betekent dit dus, dat ultrageluid geluid is met een frequentie hoger dan ca. 20 kHz. Ultrageluid wordt gebruikt in een groot aantal toepassingsgebieden; hier zal echter bekeken worden, waarvoor het in de medische techniek gebruikt kan worden.

Ultrageluid in de medische techniek wordt gebruikt voor:

- o therapeutische toepassingen - hierbij moet dan vooral gedacht worden aan plaatselijke verwarming. Ook het vergruizen van nierstenen valt hieronder. Dit is mogelijk door plaatselijk een zeer hoge geluidsintensiteit te creëren.
- o bloedsnelheidsmeting door middel van het doppler-effect.
- o het maken van afbeeldingen. Dit gebeurt door middel van echografie of transmissie-tomografie.

In dit hoofdstuk zal nader aandacht worden besteed aan de afbeeldingstechnieken.

Hoe wordt ultrageluid opgewekt?

Omdat ultrageluid uit enorm hoge frequenties kan bestaan, zal ultrageluid op een andere manier opgewekt moeten worden dan het ons bekende "normale" geluid. Vooral bij de wat hogere frequenties (vanaf enkele tientallen kHz) wordt gebruik gemaakt van zgn. piëzo-elektrische elementen. Een piëzo-elektrisch element bestaat uit een materiaal, dat onder invloed van een elektrisch veld vervormt. Het aanbrengen van een elektrisch veld heeft tot gevolg, dat dipoolmomenten in het materiaal veranderen, doordat dipolen verschuiven. Deze verplaatsing van ladingen uit hun evenwichtspositie gaat bij piëzo-elektrische materialen gepaard met een mechanische vervorming.

Omgekeerd brengt bij deze materialen een vervorming een verandering van de dipoolmomenten teweeg, wat dan weer een elektrisch veld veroorzaakt. Op deze manier kunnen

piëzo-elektrische elementen dus ook als ontvanger voor (ultra)geluid fungeren.

2.1 Echografie.

Zoals de naam al zegt, worden de afbeeldingen bij echografie verkregen door middel van echo's. Bij echografie wordt een korte geluidspuls het te onderzoeken weefsel ingestraald. Direct nadat het piëzo-elektrisch element het geluid heeft uitgezonden, wordt het element gebruikt als ontvanger. Alle geluid dat gereflecteerd en ontvangen wordt, geeft informatie over het binnenste van het te onderzoeken weefsel:

hoe dieper het oppervlak zit waartegen de bundel weerkaatst, desto later de echo terugkomt. Hoe groter de verschillen in akoestische impedantie, desto groter de amplitude van de echo.

De reflecties die worden opgevangen, kunnen op twee manieren zijn ontstaan, nl. door speculaire reflecties, welke ontstaan als een geluidsgolf een stapvormige verandering in akoestische impedantie ontmoet, en door diffuse reflecties, die ontstaan door een groot aantal kleine veranderingen in impedantie.

Het is vooral deze laatste vorm van reflectie, die bij echografie wordt gemeten.

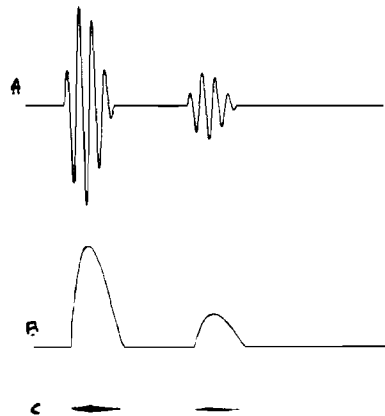
Er zijn verschillende soorten echografie. De verschillende soorten echografie die gebruikt worden, komen hieronder ter sprake.

* A-mode. Hierbij wordt het ontvangen signaal alleen gelijkgericht en afgevlakt en vervolgens op een beeldscherm (bijvoorbeeld een oscilloscoop) weergegeven. Het signaal kan er dan uit zien, zoals in figuur 2.1^b.

Met de A-mode kan vrij nauwkeurig de tijdsvertraging van het ontvangen signaal bepaald worden en dus ook de afstand die het geluid heeft afgelegd. Deze manier van echografie wordt dan ook vaak gebruikt om de plaats van het tussenschot van de beide

hersenhelften te bepalen, of om afstanden in het oog mee op te meten.

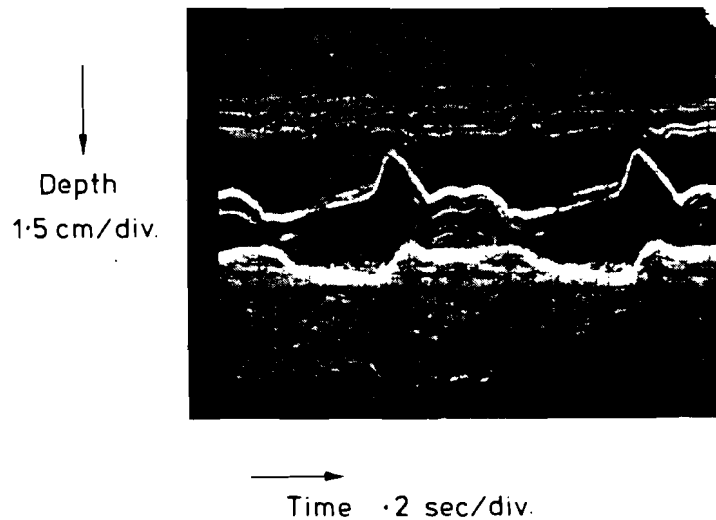
* B-mode. Deze methode is te vergelijken met de A-mode: het ontvangen signaal wordt ook hier eerst gelijkgericht. Nu wordt dit gelijkgerichte signaal echter niet gebruikt om de straal op het scherm in de Y-richting te verplaatsen, maar om de intensiteit van de straal te regelen. Bij een oscilloscoop komt dit dan neer op het op de Z-ingang aansluiten van het signaal. In figuur 2.1^c is te zien hoe een signaal in de B-mode eruit zou kunnen zien.



Figuur 2.1 a: ontvangen signaal, b: A-mode, c: B-mode.

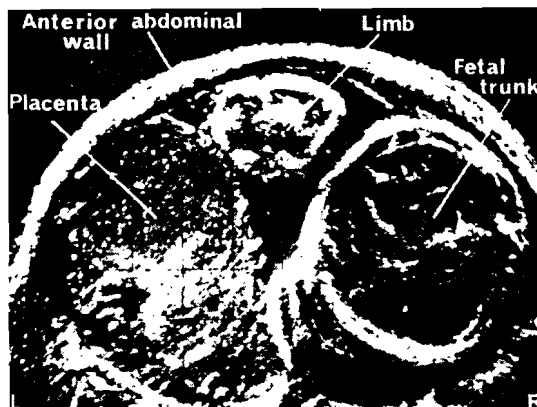
De B-mode wordt meestal niet zo in zijn zuivere vorm gebruikt, omdat dan de A-mode beter te gebruiken is. Als we de B-mode echter gaan uitbreiden met een scanbeweging, dan komen we op zeer nuttige metingen. Er zijn dan de volgende mogelijkheden:

* De M- of IM-scan. Hier worden een aantal lijnen, weergegeven in de B-mode, onder of naast elkaar op het beeldscherm geschreven. Dit gaat zeer eenvoudig met een lang nalichtende scoop. Doordat elke volgende lijn later in de tijd is geschreven, krijgen we informatie over bewegende delen. In figuur 2.2 is hiervan een voorbeeld te zien. De lijnen die getekend worden, zijn dus steeds op dezelfde plaats opgemeten; er vindt geen verschuiving in een vlak plaats.



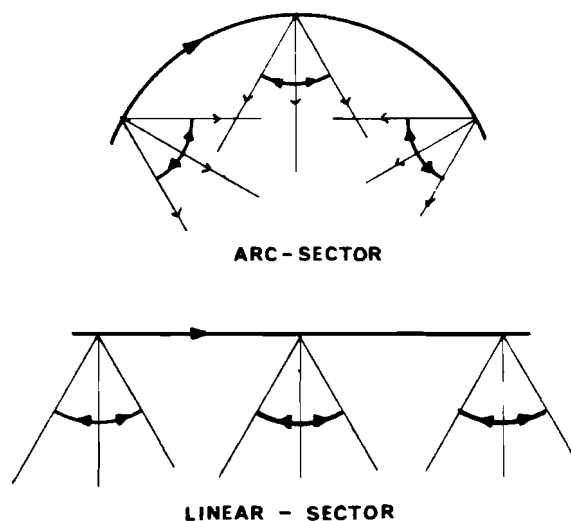
Figuur 2.2

* De B-scan. Waren de lijnen bij de M-scan naast elkaar in de tijd uitgezet, bij de B-scan zijn de verschillende lijnen naast elkaar in de plaats uitgezet. Door de transducer elektro-mechanisch of met de hand te bewegen, kunnen B-mode lijnen in verschillende richtingen (een groot aantal lijnen naast elkaar: de lineaire scan; of lijnen over een groot aantal hoeken: de sector scan) verkregen worden, die bij elkaar een B-scan vormen. Al deze opnames naast elkaar geven zo een doorsnede van het betreffende lichaam (zie Figuur 2.3).



Figuur 2.3

Als de transducer zowel lineair als onder verschillende hoeken wordt bewogen (een combinatie van de lineaire scan en de sector scan), dan spreken we over een compound B-scan. De transducer is hier gekoppeld aan een mechanische constructie, waarmee zowel de plaats van de transducer als de hoek waaronder de transducer staat, nauwkeurig kunnen worden bepaald. Bij de compound B-scan kan de transducer bijvoorbeeld bewegen zoals in figuur 2.4 is te zien.



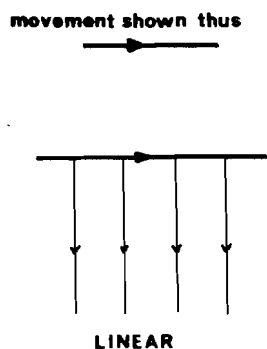
Figuur 2.4

Tenslotte zijn er nog de 'real-time' scanners. De beelden die hiermee verkregen worden lijken op de B-scan; echter de opnames hier zijn in plaats van met de hand, uitsluitend elektronisch via een lineaire- of sectorscan gemaakt.

De complete plaatjes worden nu zo snel na elkaar geschreven, dat een film-idee verkregen wordt: eventueel bewegende delen in het te meten voorwerp zie je ook echt bewegen. Deze opnames kunnen verkregen worden door een transducer snel rond te laten draaien, waardoor het te onderzoeken weefsel door middel van een waaivormig bewegende bundel wordt belicht (de sector scan).

Een andere manier is het gebruik van een array van elementen. Deze elementen kunnen dan achtereenvolgens aangestuurd worden, waardoor een lineaire verschuiving van de bundel ontstaat (de lineaire scan, zie fig 2.5), of de elementen worden zo aangestuurd, dat de geluidsbundel over een bepaalde hoek

verdraaid wordt, waardoor een veld wordt verkregen, dat lijkt op dat van het ronddraaiende element (een sectorscan). Hoe het mogelijk is de hoek waaronder een array een geluidsbundel uitzendt te verdraaien, zal in hoofdstuk 4.1 nog ter sprake komen.



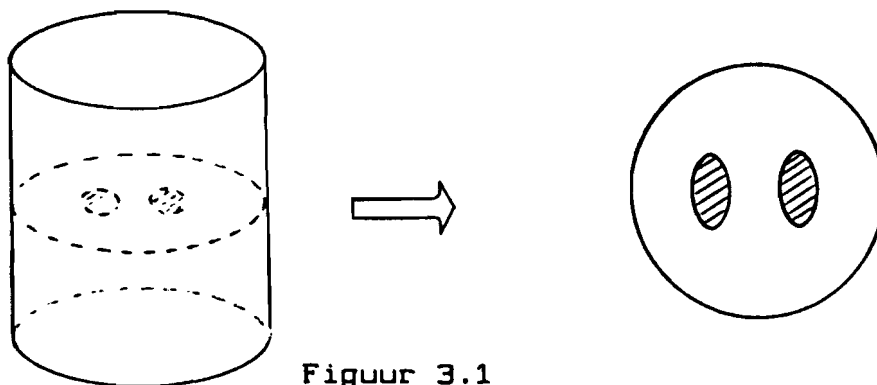
Figuur 2.5

3. Transmissie tomografie

3.1 Wat is tomografie?

Het woord Tomografie is afgeleid van de Griekse woorden tomos en grafein en betekent letterlijk het schrijven (of tekenen) van een doorsnede.

Bij computertomografie wordt (meestal) een dwarsdoorsnede van een voorwerp bepaald (zie fig. 3.1). De data, waaruit deze



Figuur 3.1

doorsnede wordt berekend, wordt verkregen door het voorwerp van een aantal kanten te bekijken. Afhankelijk van de gebruikte techniek, wordt dit kijken gedaan met röntgenstralen (bij de bekende CT-Scan), of ultrageluid (bij de hier gebruikte ultrageluid transmissie tomografie). Het bekijken van een voorwerp houdt in, dat aan de ene kant van het voorwerp röntgenstraling of ultrageluid wordt uitgezonden en dat deze straling aan de andere kant wordt opgemeten.

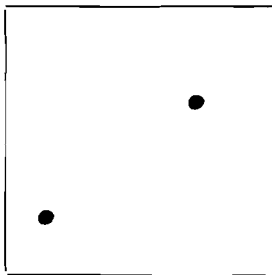
Het berekenen van een doorsnede uit de verschillende projecties gebeurt door de zgn. Back projection: alle projecties die van het voorwerp zijn verkregen, worden "teruggeprojecteerd", zodanig dat een afbeelding van de oorspronkelijke doorsnede ontstaat.

Het voert te ver om precies uit te leggen hoe deze terugprojectie in z'n werk gaat en zeker om het principe te bewijzen. Wat wel aangetoond zal worden, is dat één enkele projectie te weinig is om een goede afbeelding te verkrijgen. Om twee voorwerpen te localiseren zijn ten minste 3 afbeeldingen nodig. Hieronder zal uitgelegd worden, hoe dit in z'n werk gaat.

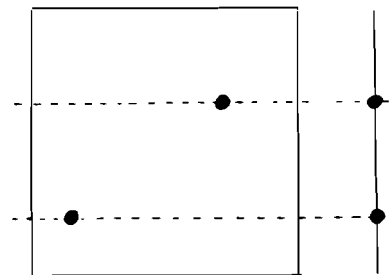
Stel, we hebben een vierkant oppervlak met twee palen (zie figuur 3.2). Gaan we nu met een lamp links staan en kijken we rechts wat voor schaduwbeeld we vinden, dan zullen we - afhankelijk van waar de paaltjes precies staan - een of twee schaduwen vinden (fig. 3.3). We weten dan al op welke lijn(en) de paaltjes staan.

Gaan we ook nog een keer van boven naar onder te werk, dan krijgen we weer een of twee schaduwen (fig. 3.4). De paaltjes kunnen nu alleen nog maar op de kruispunten van de getekende lijnen staan. Daarmee is het aantal mogelijke plaatsen waar de paaltjes kunnen staan, al teruggebracht van oneindig veel naar maximaal twee combinaties.

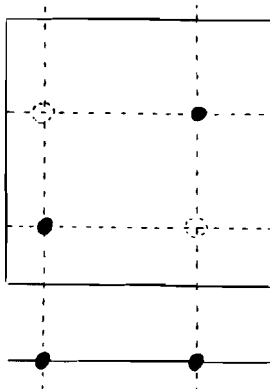
Nu is echter nog niet exact bepaald waar de paaltjes staan, dus we moeten nog een laatste meting uitvoeren. Als we deze meting schuin uitvoeren (zie fig 3.5), dan is eenduidig vast komen te staan waar de twee paaltjes zich bevinden.



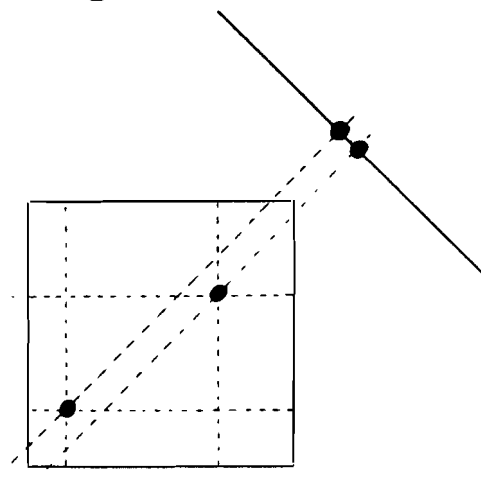
Figuur 3.2



Figuur 3.3



Figuur 3.4



Figuur 3.5

Als er meer palen zijn, dan zullen meerdere metingen nodig zijn. Als er enorm veel palen staan, dan zal bovenstaand voorbeeld niet meer opgaan, omdat op geen enkele manier nog licht van de ene kant naar de andere kant wordt doorgelaten. We moeten dan veronderstellen dat de palen halfdoorlatend zijn (wat helemaal geen vreemde aanname is, als met röntgenstralen of ultrageluid gewerkt wordt: slechts een enkel weefsel veroorzaakt volkomen schaduwen), zodat we variaties in lichtintensiteit krijgen. Met behulp van een goed algoritme is het dan mogelijk om de paaltjes nog steeds juist te localiseren.

3.2 Beschrijving van de hier aanwezige meetopstelling

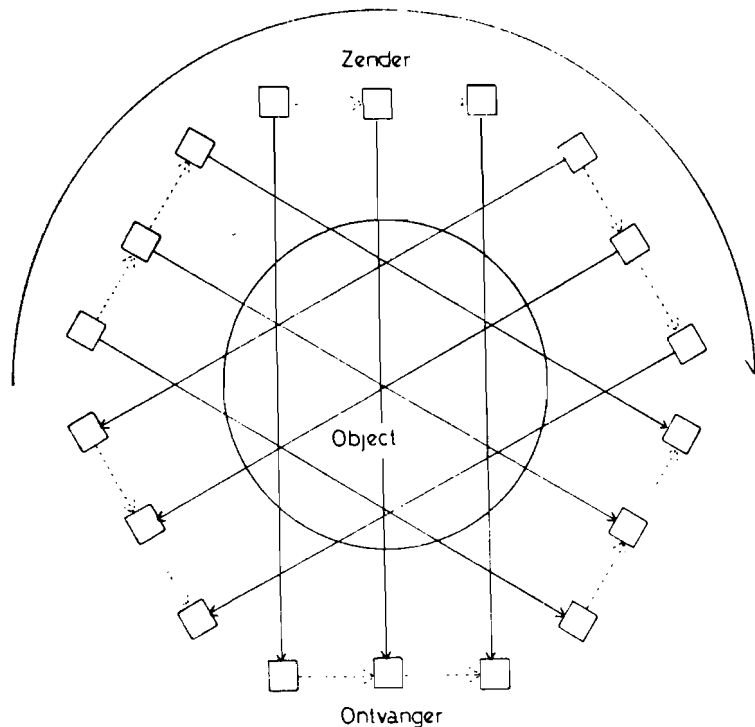
De afgelopen jaren is in de vakgroep Medische Elektrotechniek een opstelling gemaakt waarmee het mogelijk is van een voorwerp een afbeelding te krijgen.

Bij de hier aanwezige meetopstelling wordt gebruik gemaakt van tomografie om afbeeldingen van voorwerpen te krijgen. In tegenstelling tot de gangbare echografie, worden hier dan ook geen echo's gemeten, maar wordt gekeken naar het geluid dat door het voorwerp heen is gestraald.

Van het geluidssignaal dat ontvangen wordt, zijn dan een aantal parameters te bepalen, die (min of meer) specifiek zijn voor het tussenliggende weefsel. De parameters die op het ogenblik gemeten worden, zijn de looptijd van het signaal door het voorwerp en de gemiddelde frequentie. De laatste meting wordt ook wel absorptiemeting genoemd. Door een frequentie afhankelijke demping of absorptie treedt nl. een frequentieverschuiving op. Deze frequentie-afhankelijkheid van de absorptie (hoe hoger de frequentie, hoe groter de absorptie) is één van de redenen waarom de frequentie die in deze vakgroep gebruikt wordt, meestal tussen de 1 en de 2 Mhz ligt. Zouden hogere frequenties gebruikt worden, dan zou van het uitgezonden signaal steeds minder, en mogelijk te weinig, ontvangen worden.

De opstelling is als volgt opgebouwd:
aan een draaibaar plateau zijn twee transducers gemonteerd, die

parallel ten opzichte van elkaar kunnen bewegen. Eén transducer fungeert als zender en één als ontvanger. Om een meting te verrichten, worden de transducers van links naar rechts (of andersom) bewogen, zodat een projectie loodrecht op deze bewegingsrichting ontstaat. Vervolgens draait het plateau een stukje en wordt opnieuw een projectie gemaakt. Dit gaat zo door, totdat over een halve cirkel alle projecties zijn gemaakt. In figuur 3.6 is dit schematisch te zien.



Figuur 3.6

De looptijd wordt opgemeten door middel van het rondzingprincipe:

op een bepaald moment zendt het éne element een puls uit. Na een bepaalde tijd (de looptijd) komt deze puls aan bij de ontvanger. Zodra de ontvangstelektronica deze puls detecteert, wordt weer een puls uitgezonden. Terwijl het geluid zo aan het rondzingen is, wordt op een gegeven moment een meting gestart, die bepaalt, hoelang het duurt voordat het geluid een X aantal maal is rondgelopen (in de praktijk bedraagt X zo'n honderd tot vierhonderd maal). De tijd T die gemeten wordt, is de tijd nodig voor het X maal rond gaan. Hieruit wordt de looptijd t bepaald uit $t = T / X$.

Door niet één rondzingtijd te meten, maar X rondzingtijden, wordt de nauwkeurigheid van de meting een factor X groter: als de meetnauwkeurigheid maximaal 500 ns is en er wordt 100 maal 'rondgezongen', dan is de nauwkeurigheid in de bepaling van de looptijd, t , 5 ns.

De verplaatsing van de transducers en de verdraaiing van het plateau gebeurt met behulp van stappenmotoren. Het meten gebeurt met een personal computer (een Apple uitgerust met een speciaal ontwikkelde uitbreidingskaart). Aan de meting zoals die nu plaatsvindt kleven nog een aantal bezwaren. De bezwaren die voor de rest van het verslag van belang zijn, zijn de volgende:

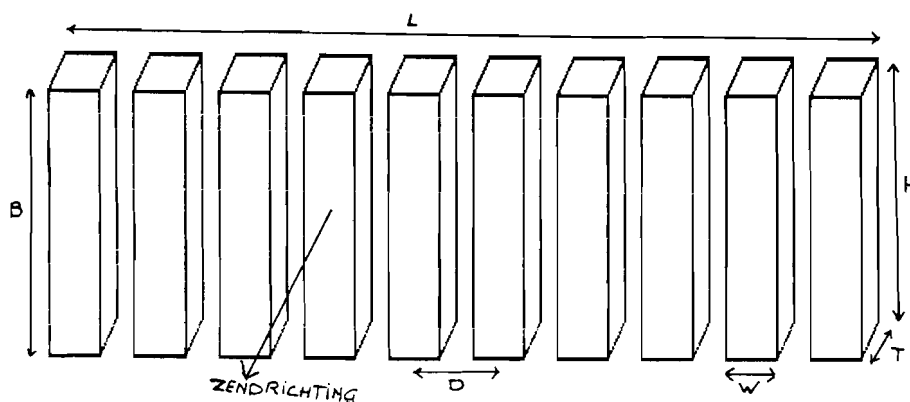
- * De bundelvorm van de huidige elementen is niet optimaal. Een ideale bundel is smal en evenwijdig; de bundels die hier optreden zijn relatief breed en divergent. Dit heeft tot gevolg, dat er nogal wat ongewenste effecten optreden, die de meting kunnen verstoren.

- * Het verplaatsen van een element gebeurt mechanisch; dit is relatief traag, er treden trillingen en wervelingen op in het water en door speling in de onderdelen treedt een hysteresis verschijnsel op: een meting uitgevoerd van links naar rechts is niet exact gelijk aan een meting van rechts naar links.

Een mogelijke oplossing voor bovenstaande problemen is het gebruik van een lineair array.

4 Het lineair array.

Een lineair array bestaat uit een aantal transducers naast elkaar die, in principe, elk apart aan te sturen zijn. Een dergelijk array bestaat meestal uit rechthoekige elementen, die, om een zo groot mogelijk oplossend vermogen te krijgen, liefst zo smal mogelijk zijn en zo dicht mogelijk bij elkaar staan (zie fig. 4.1). Uit praktische overwegingen worden de afmetingen echter ook weer niet te klein genomen. In dit en het volgende hoofdstuk zal nog duidelijk worden waarom deze eisen aan de elementen gesteld worden.



Figuur 4.1

Aan de hand van het array in figuur 4.1 kunnen we een paar afspraken maken over de gebruikte terminologie. Als we het hebben over de lengte van het array, dan bedoelen we lengte L . De breedte van het array is dan B . Praten we over de lengte van een element, dan bedoelen we lengte H ; praten we over de breedte van een element, dan bedoelen we breedte W . Onder de interelementsafstand verstaan we de afstand tussen het middelpunt van twee elementen : D . Tenslotte is er nog de dikte van een element: T .

4.1 Het ultrasone veld: hoe is het te focuseren?

In het vorige hoofdstuk is ter sprake gekomen, dat we de uitgezonden bundel van de transducer zo smal mogelijk en zo

weing mogelijk divergent willen hebben. Dit om allerlei hinderlijke bijverschijnselen zoveel mogelijk te verminderen. Een mogelijkheid om een relatief smalle bundel te krijgen is focuseren. Als een bundel gefocusseerd wordt, dan wordt rond het brandpunt een smalle bundel verkregen. Door nu het brandpunt juist in te stellen, is het mogelijk in het te onderzoeken gebied (in het voorwerp) een groter oplossend vermogen te krijgen dan wanneer niet gefocusseerd wordt.

Aangezien geluid een golfverschijnsel is, is het, net als elk ander golfverschijnsel, mogelijk om geluid door middel van bepaalde lenzen af te buigen en te focuseren. De lenzen die hier gebruikt worden om te focuseren (de zgn. akoestische lenzen) zijn meestal hol; het kunsthars, waar de lenzen hier van gemaakt worden, heeft een hogere geluidssnelheid dan water.

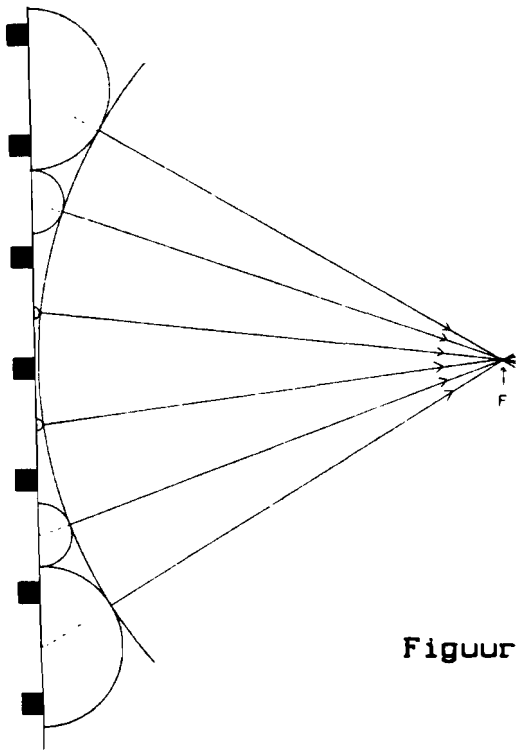
Een nadeel van het gebruik van lenzen is (zoals dadelijk zal blijken), dat ze in principe niet gebruikt kunnen worden, om de geluidsbundel van een array in de lengterichting van dat array te focuseren. Verder mogen de elementen niet te klein zijn om te kunnen focuseren: een minimale breedte (diameter) van een element is al gauw zo'n tien maal de golflengte (zie form. 6.1).

Als we gebruik maken van een array en we zouden gebruik willen maken van een lens, dan zouden we dus vrij brede elementen moeten gebruiken. Zoals in de volgende paragraaf ter sprake zal komen, moeten de elementen echter niet te breed gekozen worden, als men een goed oplossend vermogen wil krijgen. Het is dus onmogelijk om een lens te gebruiken als we bij een array elk element willen focuseren. Ook kunnen we niet gaan focuseren door een lens voor meerdere elementen te gelijk te plaatsen. Dit maakt het immers onmogelijk om te scannen: de lens zou dan mee moeten bewegen.

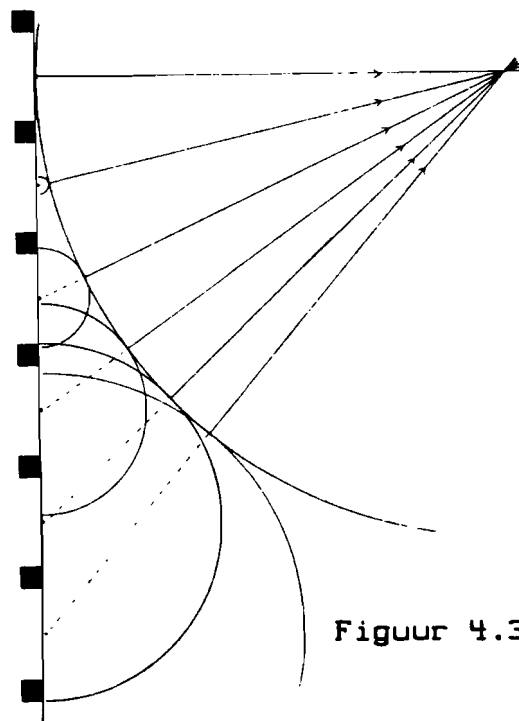
Als we bij een array willen focuseren, dan zal een andere manier dan een lens gevonden moeten worden. Welke manier dit moet zijn, kunnen we achterhalen, als we kijken wat een lens eigenlijk doet met de stralenbundel. We nemen hier als voorbeeld de akoestische holle lens. In deze lens plant het geluid zich sneller voort dan in het water. Als we nu na de lens gaan kijken in een vlak evenwijdig aan de transducer, dan zien we, dat het geluid dat langs de buitenkant van de lens is gegaan een voorsprong heeft op het geluid dat door het midden van de lens is

gegaan. De lens zorgt er dus voor dat verschillende delen van de geluidsbundel verschillende vertragingen krijgen.

Dit is bij een array te simuleren, door de elementen niet gelijktijdig aan te sturen, maar de buitenste elementen iets eerder aan te sturen dan de binnenste. Deze manier van aansturen (binnenste elementen eerder dan de buitenste) noemen we in de rest van dit verslag het focuseren van een array; een gefocusseerde bundel is een geluidsbundel, die verkregen wordt door focuseren. In figuur 4.2 is te zien, wat voor gevolgen het niet gelijktijdig aansturen van de elementen kan hebben (volgens het theorema van Huygens): er kan focussing plaats vinden als de elementen op een geschikte manier aangestuurd worden. Tevens is het mogelijk de bundel te "sturen" (zie fig. 4.3). Hiermee is dan ook duidelijk geworden, waarom een array gebruikt kan worden om een sectorscan te verkrijgen (zie paragraaf 2.1).



Figuur 4.2



Figuur 4.3

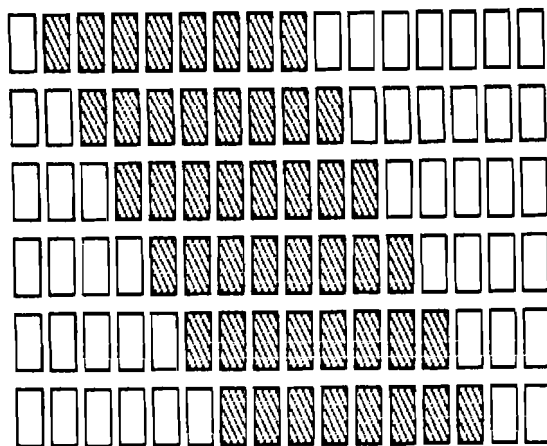
In werkelijkheid gedraagt het geluid zich echter niet zo mooi als uit bovenstaande plaatjes zou kunnen blijken. Doordat de gebruikte golflengte relatief groot is, spelen hier verschijnselen zoals diffractie e.d. een rol, die bij kleinere golflengtes (zoals bij licht) meestal geen rol spelen. Als men aan het ultrasonische veld wil gaan rekenen, is het dus niet mogelijk de vereenvoudigde lenzenformules te gebruiken die voor licht

meestal zonder meer te gebruiken zijn. Duerinckx [7] geeft aan hoe de elementen aangestuurd moeten worden om op een bepaalde plaats het brandpunt te krijgen en hoe het veld vervolgens te bepalen is. In hoofdstuk 7 zal deze theorie verder toegelicht worden.

4.2 Het scannen.

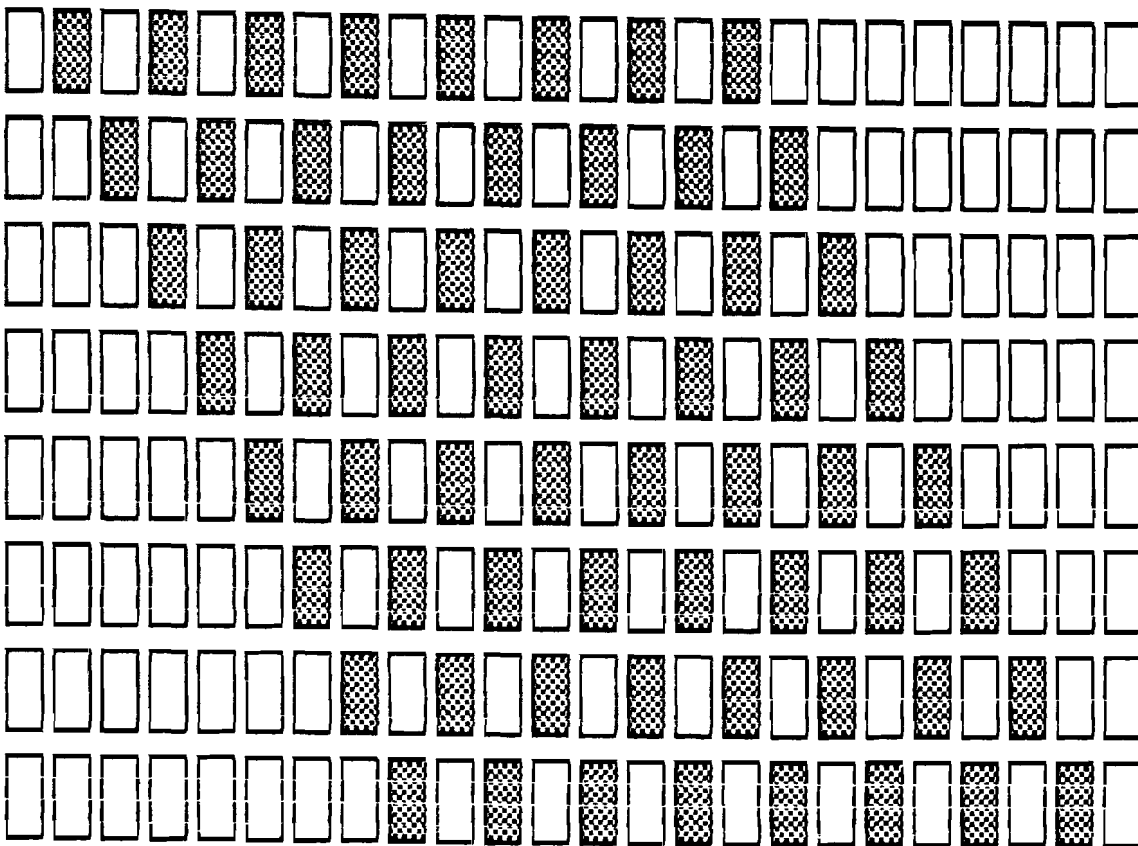
In de vorige paragraaf is duidelijk geworden, dat, wil men met een array op een redelijke manier gaan focuseren, meerdere elementen binnen een korte tijd na elkaar aangestuurd moeten worden. Als we echter willen gaan scannen (de bundel van de ene kant van het array naar de andere kant laten verschuiven), dan willen we, om een zo groot mogelijk oplossend vermogen te krijgen, de stapgrootte zo klein mogelijk houden. We willen dus per stap de bundel liefst slechts één interelementsafstand verschuiven.

Als er acht aaneengesloten elementen gebruikt worden om te focuseren, bijvoorbeeld de elementen 1 t/m 8, dan verschuift bij één stap een element van de ene "rand" naar de andere, zodat uiteindelijk de elementen 2 t/m 9 aangestuurd zijn. (Met rand is hier de bedoeld, de zijkant van het groepje van acht elementen). In figuur 4.4 is dit scannen te zien voor een array van 16 elementen, waarbij steeds acht elementen tegelijkertijd aangestuurd worden. Horizontaal zijn daar de verschillende elementen uitgezet, verticaal de verschillende stappen.



Figuur 4.4

In het volgende hoofdstuk wordt bekeken wat voor invloed een andere aansturing van de elementen heeft op het ultrasone veld. Een manier die daar ter sprake komt, is het om en om aansturen van de elementen. Ook nu zal liefst weer over één element verschoven moeten worden. In figuur 4.5 is te zien hoe het scannen er dan uit ziet (bij een array van 24 elementen).



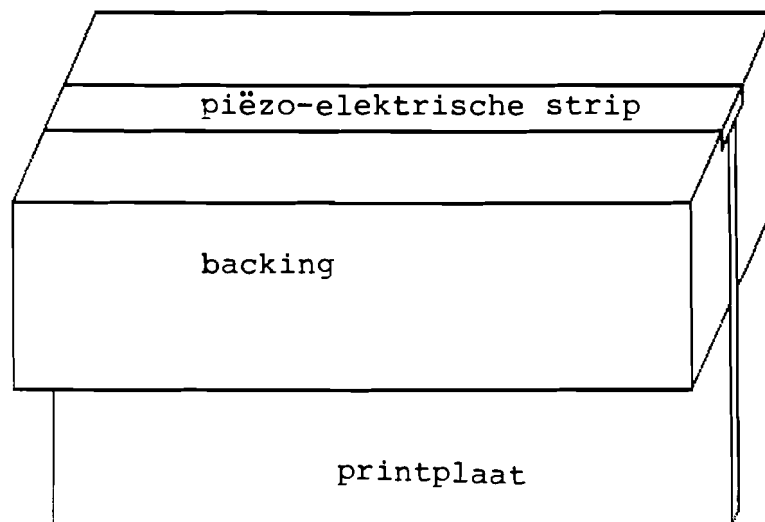
Figuur 4.5

4.3 Fabricage van een array.

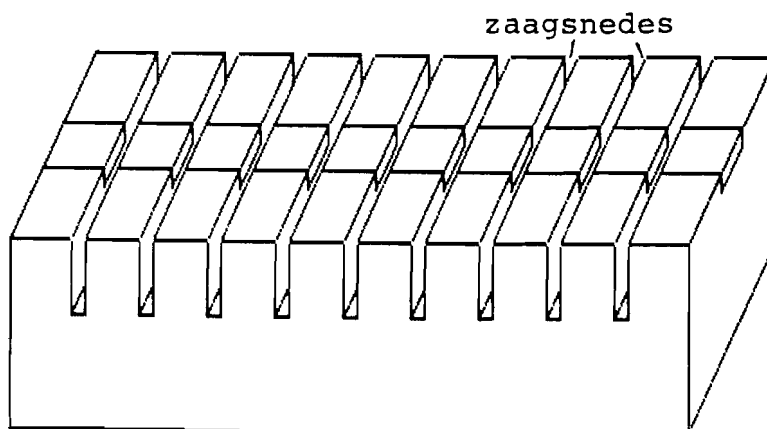
De arrays die hier gebruikt zijn, zijn allemaal op de T.H. gemaakt. De belangrijkste reden hiervoor is, dat het vrij duur is om een array te kopen. Ook bevatten gekochte arrays vaak al elektronica, welke hier niet is te gebruiken. De eerste arrays, waar ook alle metingen aan verricht zijn die verderop in het verslag staan, zijn als volgt gemaakt:

Er wordt uitgegaan van een lange strip PXE-5 (een bepaald piezo-elektrisch materiaal), die zowel aan de boven- als aan de onderzijde is voorzien van een dun laagje zilver. Eén kant van de strip wordt vastgesoldeerd aan een print waarop 96 sporen zitten. Langs deze sporen kunnen de elementen later aangestuurd worden. Wat voor later in het verslag nog van belang is, is dat de sporen om en om aan beide kanten van de print zitten: de even sporen aan de éne kant, de oneven sporen aan de andere kant.

Vervolgens wordt een backing aangebracht om de elementen goed te dempen: uitslingering, reflecties in het array en mechanische koppeling tussen elementen is ongewenst. We krijgen dan het beeld van figuur 4.6. Vervolgens wordt de strip PXE gezaagd en wel zo, dat er 96 elementen ontstaan, met de achterkant van elk element verbonden met één printspoor (zie fig. 4.7).



Figuur 4.6



Figuur 4.7

Tenslotte moet van alle elementen de voorzijde nog met massa verbonden worden. Dit gebeurt door dunne draadjes van de voorzijde van de elementen naar de behuizing (die met massa is verbonden) vast te solderen.

De breedte, w , van de elementen is 1,02 mm, de afstand tussen de elementen, S , is 0,25 mm. De interelementafstand $D = w + S$, is dus 1,27 mm ($\approx 1/20$ inch). De resonantiefrequentie van de elementen is 1,5 MHz.

Tijdens het experimenteren met dit array traden een aantal problemen op, die het nodig maakten een iets andere fabricagemethode toe te passen. Op de volgende pagina's zullen de genoemde problemen ter sprake komen en wordt een andere fabricagemethode voorgesteld, die echter nog niet op nieuwe array's is uitgetoet.

Het eerste probleem dat zich aanbood, was dat er regelmatig sluiting ontstond tussen de voor- en achterkant van een element. Door bijvoorbeeld oxidatie kwam er een geleidende substantie in de zaagsnedes, zodat de achterkant van de elementen contact maakte met de massa. Vooral als het array zich enige tijd in het water had bevonden (bijvoorbeeld gedurende een meting) waren vaak een aantal elementen kortgesloten.

Deze kortsluiting was meestal wel weer op te heffen door met een dun, koperen plaatje de groeven schoon te krabben. Echter in de praktijk kan natuurlijk moeilijk het array telkens uit het water genomen worden, om het even schoon te maken. Bij dit schoon krabben kwam nog een ander euvel aan het licht. De massadraadjes, die aan het zilveren oppervlak van de elementjes vastgesoldeerd zaten, bleken erg breekbaar. Vooral bij de soldeerverbinding bleken de draadjes het soms bij het minste dat ze aangeraakt werden, te begeven.

Ook liet het zilveren laagje op de elementen - waarschijnlijk door de mechanische belasting die ontstaat als de elementen geluid uitzenden - na verloop van tijd los.

Ten slotte bleek dat bij één array een aantal elementen een elektrische koppeling vertoonden. Twee direct naast elkaar gelegen elementen vertoonden nauwelijks elektrische koppeling, echter tussen twee elementen, waartussen nog een ander element zat, was een weerstand te meten van ca. $2 \text{ k}\Omega$. Tussen elementen die verder uit elkaar lagen was, als er zich een even aantal elementen tussen bevond, weer geen koppeling te meten en, als er zich een oneven aantal elementen tussen bevond, een weerstand van een aantal maal $2 \text{ k}\Omega$ te meten.

Aangezien op de print de sporen op dezelfde manier naast elkaar liggen (even sporen naast elkaar, oneven sporen op de andere kant van de print naast elkaar), zal de oorzaak van deze enigszins vreemde koppeling gezocht moeten worden op de print. De print zelf is echter goed te vertrouwen: daarop zal nauwelijks enige koppeling aanwezig zijn. Echter direct op de print, die helaas niet is afgelakt, bevindt zich ook de backing (zie fig 4.6). Deze backing zal dus licht geleidend zijn. Dit komt waarschijnlijk, omdat het wolframpoeder, dat in de backing zit, niet goed gemengd is met het kunstharis.

Zoals in het volgende hoofdstuk zal blijken, hoeft een (elektrische) koppeling tussen elementen niet nadelig te zijn; echter, de koppeling zoals die hier optreedt, is niet constant tussen het ene paar elementen en het andere: buren van elkaar hebben geen koppeling, maar buur's buren hebben wel koppeling. Verder is de grootte van de koppeling totaal niet te beheersen. De koppeling, zoals die hier optreedt, is dus duidelijk niet gewenst.

Bij een nieuw array zullen deze ongewenste effecten dus zoveel mogelijk verminderd moeten worden. Er is daarom een nieuwe fabricagemethode bedacht.

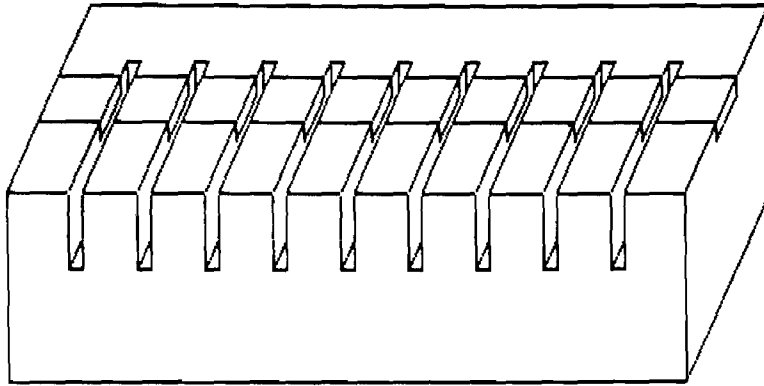
Het probleem van de koppeling tussen de elementen is tegen te gaan door te print, waaraan de elementen komen te zitten, te isoleren voordat de backing wordt aangebracht. Verder verdient het aanbeveling het backing materiaal zeer goed te homogeniseren, zodat op eventuele overgebleven contactplaatsen met de print geen koppeling kan optreden.

De sluitingen en onderbrekingen in het array zijn waarschijnlijk op te lossen door de massaverbindingen op een andere manier aan te brengen. Het belangrijkste verschil met de huidige methode is, dat op de zilverlaag, die op de PXE-strip zit, en de backing nog een laagje koper zal worden gedampt. Dit om de zilverlaag op het PXE extra te verstevigen. Verder wordt aan de voorzijde van de elementen niet meer gesoldeerd: de massaverbinding wordt nu m.b.v. elektrisch geleidende lijm aangebracht.

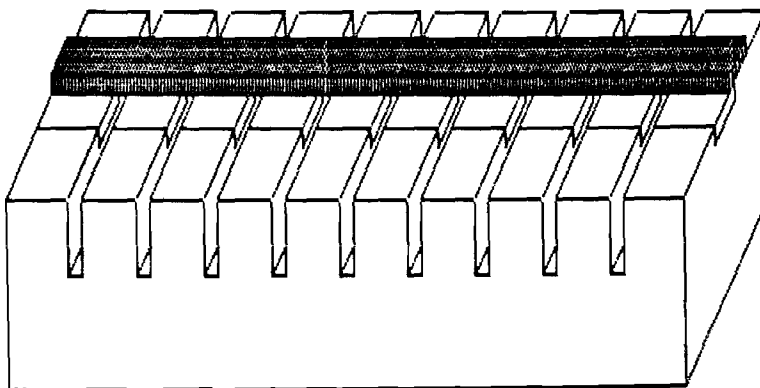
We kunnen nu de volgende methodes toepassen:

- 1) Een deel van de backing wordt niet ingezaagd (zie fig. 4.8). Vervolgens wordt op de bovenkant van het array een laagje koper gedampt, zowel op de zilverlaag van de PXE-strip als op de backing. Op dit vlakke stuk wordt de massaverbinding aangebracht door middel van een metalen (bijvoorbeeld koperen) strip, die met elk element afzonderlijk wordt verbonden (te vergelijken met

fig. 4.9). Zo'n vlak stuk waar het koper op gedampt is, heeft onder andere als voordeel, dat de voorkanten van alle elementen al met elkaar verbonden zijn. Als de metalen strip nu met een bepaald element geen goed contact maakt, dan zal dit element door de koperlaag via de andere elementen toch met de massa verbonden zijn.



Figuur 4.8



Figuur 4.9

2) Uitgaande van de situatie, waarbij het array nog over de volle breedte was ingezaagd, wordt over de backing en een klein stuk van de elementen een metalen (aluminium of koperen) strip gelijmd (zie figuur 4.9). Deze strip wordt vervolgens als massa aansluiting gebruikt. Zo zonder meer gaat dit lijmen echter niet. De lijm zal hier nl. in de zaagsnedes terecht komen en sluiting veroorzaken. Voordat gelijmd wordt, zullen de zaagsnedes dus eerst opgevuld moeten worden. Hierbij valt als vulmiddel te denken aan was, kaarsvet, siliconenkit of dunne, plastic draadjes. Dit opvullen van de zaagsnedes heeft ook nog als voordeel, dat er in de zaagsnedes geen (geleidende) stofdeeltjes kunnen komen.

3) De beste methode is waarschijnlijk een combinatie van de twee bovenstaande methodes: als de strip is ingegoten wordt de koperlaag opgedampt. Vervolgens wordt een metalen strip op het array gelijmd, zoals bij methode 2. (Wat ook mogelijk is, is dat de metalen strip naast de PXE-strip wordt ingegoten en dat deze door middel van het opdampen van koper en door lijmen met elkaar verbonden worden).

Kierna pas wordt het array gedeeltelijk ingezaagd, zoals bij 1) is vermeld (zie ook fig. 4.8), waarna de zaagsnedes opgevuld worden om indringen van water en andere sluiting veroorzakende stoffen tegen te gaan. Deze methode combineert alle voordelen van de eerste twee methodes.

Tenslotte moet het gebruik van een ander piezo-elektrisch materiaal nog worden genoemd als mogelijkheid een beter array te maken. Hierbij kan dan gedacht worden aan het zgn. PVDF-folie. Dit materiaal kan in elke willekeurige vorm worden gebracht en zeer eenvoudig worden gesneden (of geknipt).

Deze nieuwe fabricagemethode is, voor zover mogelijk, op de oude array's uitgetoet. De oude array's zijn daartoe op de volgende wijze gemodificeerd:

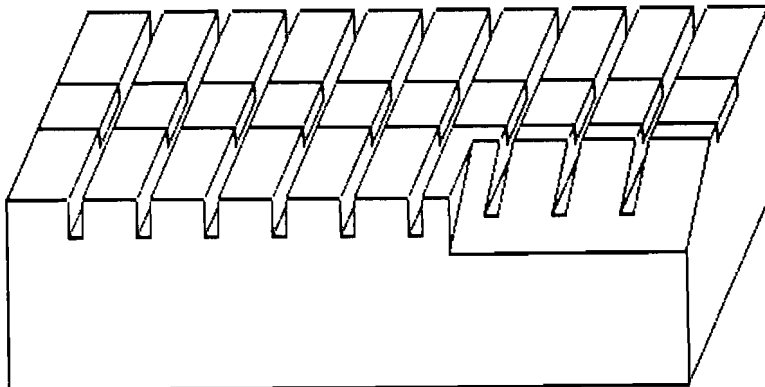
Om te beginnen is de al aanwezige laag zilver verstevigd door er een extra laagje koper op te dampen. Als zowel het zilver als de

backing, waar het koper opgedampt wordt, goed schoon zijn gemaakt, blijft dit koper goed zitten.

De draadjes zijn vervangen door een metalen strip, die voor een klein gedeelte over de elementen valt, en die met elektrisch geleidende lijm is vastgelijmd (zie figuur 4.9).

Het opvullen van de zaagsnedes is geprobeerd met dunne plastic draadjes; andere vulmiddelen hadden het nadeel, dat ze de koperen laag op het PXE zouden verontreinigen, waardoor de lijm niet meer zou hechten. Echter ook de dunne, plastic draadjes zijn niet aangebracht, omdat dit een vrij lastig karwei is, waarbij soms vrij veel kracht op de elementen moest worden uitgeoefend. Door voorzichtig te lijmen en de zaagsnedes (indien nodig) voorzichtig schoon te krabben, is het aantal ontstane sluitingen in het opgeknapte array tot een minimum beperkt gebleven (bij een nieuw array zijn sluitingen echter niet toe te staan).

Het niet volledig inzagen van de backing is gesimuleerd door de backing van de oude array's voor een gedeelte weg te vijlen. In figuur 4.10 is dit schematisch te zien. (Hier is alleen een gedeelte aan de rechterkant weggeslepen; in werkelijkheid werd de volledige kant weggevijld.)



Figuur 4.10

Concluderend mag gezegd worden, dat deze nieuwe fabricagemethode nog niet volledig is geslaagd op de oude arrays, echter de voorlopige resultaten geven voldoende vertrouwen in deze methode.

5. Het aansturen van het array.

In het vorige hoofdstuk hebben we gezien hoe we een array kunnen focuseren en hoe het scannen moet gebeuren. We kunnen nu gaan kijken welke verschillende manieren er zijn om het array aan te sturen en welke manier het beste resultaat geeft.

Peter Wardenier [17] heeft, voornamelijk in theorie, al bekeken wat er met het veld gebeurt bij bepaalde aansturingen. Daaruit is o.a. naar voren gekomen, dat door het toepassen van Gaussische apodisatie de grootte van de zijlobben flink kan worden verminderd. Verder heeft hij acht elementen gebruikt, om, met behulp van focuseren, een smal, niet te divergent veld te krijgen.

Tijdens mijn metingen aan het array, nadat de scan-elektronica was gerealiseerd (zie hoofdstuk 6), bleek echter, dat bij het gebruik van acht elementen om te focuseren, van het effect van het focuseren (het smaller worden van de bundel) niet veel opviel (zie paragraaf 5.1). Dit is de aanleiding geweest om nog eens te bekijken wat voor invloed een andere aansturing van het array zou hebben op het ultrasone veld.

5.1 Metingen aan het ultrasone veld.

Voordat de meetresultaten van het ultrasone veld besproken worden, zullen we eerst kijken, hoe dit veld opgemeten wordt.

Om te kijken hoe het ultrasone drukveld eruit ziet bij een bepaalde aansturing van het array, moet dit worden opgemeten in een waterbak. Voor het opmeten van het veld gebruiken we een zo klein mogelijk ontvangst-element. Hoe kleiner de gebruikte transducer, hoe groter het oplossend vermogen: het opgemeten signaal wordt immers gemiddeld over het transduceroppervlak. De transducer die speciaal voor deze metingen is gemaakt, heeft een doorsnede van 5 mm.

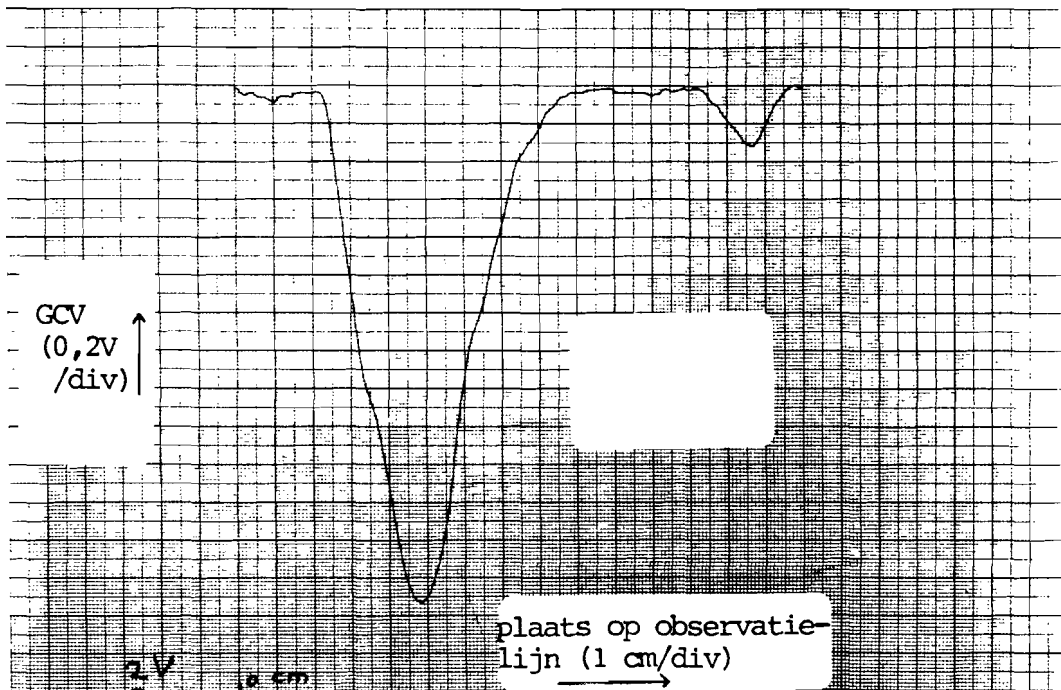
Zowel het array als de ontvangst-transducer worden in een waterbak geplaatst. Hierbij moeten beide transducers zo goed

mogelijk op dezelfde hoogte in het water geplaatst worden.

Het array wordt onbeweeglijk opgesteld; de ontvanger wordt bevestigd aan een verschuifbare rail, die zo goed mogelijk parallel moet lopen aan het array. Door nu de ontvanger op een bepaalde afstand van het array te zetten en vervolgens te verschuiven, kan het drukverloop over een bepaalde lijn op een bepaalde afstand van het array bepaald worden.

Als meetopstelling is de hier aanwezige transmissie tomografie opstelling gebruikt. De waterbak is voldoende groot om het array in te plaatsen; tevens is de verschuifbare rail aanwezig, waarlangs het ontvangstelement met behulp van een stappenmotor verschoven kan worden. Het ontvangst-element is aangesloten op de de versterker van de looptijd meetkast (zie appendix 1 en N.J.Bos [13]). Van de middenversterker is de gain control spanning (GCV) gebruikt om het drukveld te bepalen. Deze GCV is een gelijkspanning, die een maat is voor de piekwaarde van het ontvangen signaal.

Om curves van het veld op te tekenen, is gebruik gemaakt van een X-Y schrijver, die de GCV uitzette tegen de plaats van het element. In figuur 5.1 is hiervan een voorbeeld te zien.

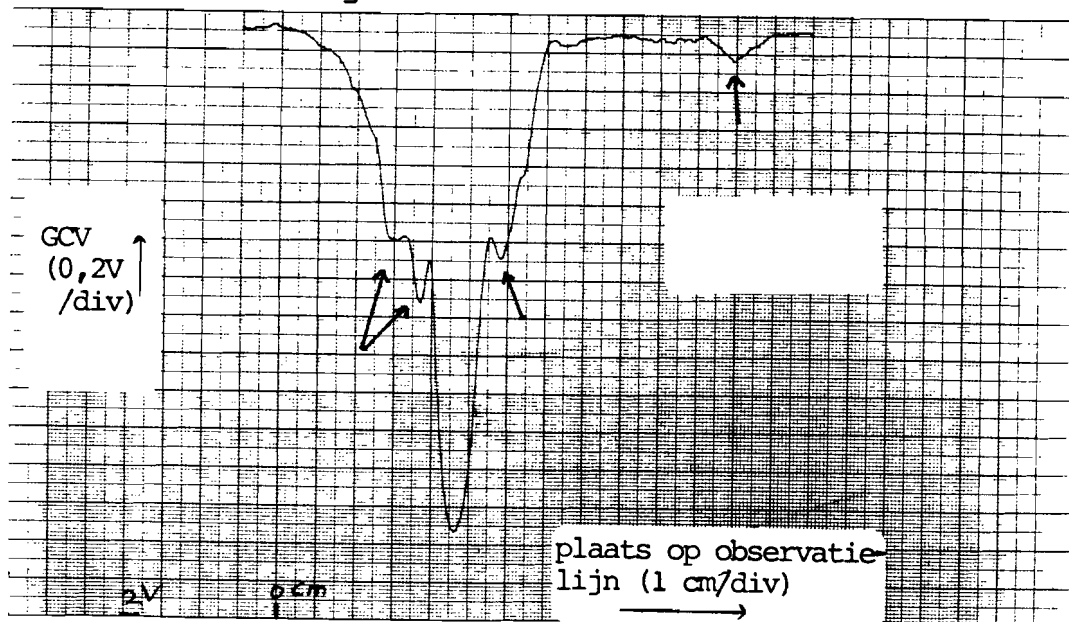


Figuur 5.1.

Bij het opmeten van het ultrasone drukveld, dient men met een aantal dingen rekening te houden. Om te beginnen is de GCV niet lineair afhankelijk van de ontvangen piekspanning. In appendix 2 is te zien hoe deze GCV afhangt van de piekspanning. Verder is de maximale waarde van de GCV niet stabiel in de tijd. Pas als de looptijdmetr enige uren aanstaat, kan de GCV z'n maximale waarde bereiken. Waarom dit zo lang duurde was helaas niet te achterhalen.

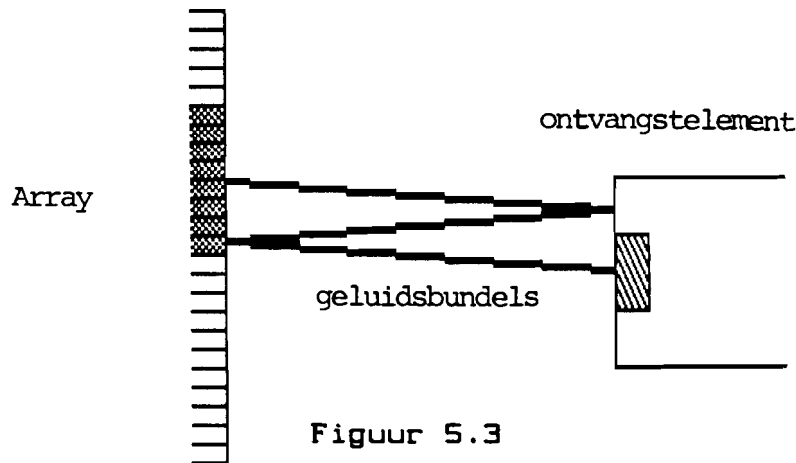
Speciale aandacht verdient ook de H.F. instraling. Bij het maken van de zendpulsen, komt nogal wat hoogfrequente elektro-magnetische straling vrij, die de versterker in de looptijdmetr kan ontvangen. Dit heeft tot gevolg, dat de GCV soms niet de juiste waarde lijkt te hebben. Alle mogelijke H.F. bronnen moeten dan ook zo goed mogelijk afgeschermd worden.

Tenslotte kunnen reflecties van het ultrageluid de meting totaal in de war gooien. Hierbij moet gedacht worden aan reflecties in de waterbak, die vaak door wat extra dempingsmateriaal wel weer op te heffen zijn, en aan reflecties tussen het array en de ontvangst-transducer, die vaak veel lastiger te bestrijden zijn. In figuur 5.2 is een meting te zien, waar op het einde van het meettraject een reflectie tegen de wand van de waterbak is opgetreden. Verder zijn rond de hoofdbundel een aantal opslingeringen te zien. Deze zijn afkomstig van reflecties tussen array en element.



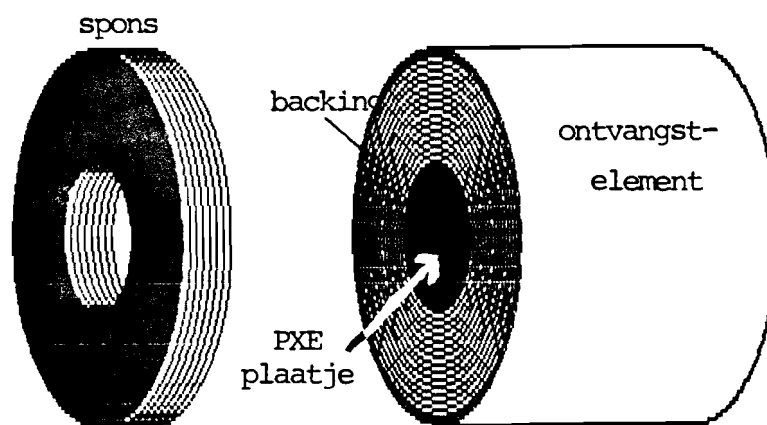
Figuur 5.2.

Aangezien de reflecties tussen het array en de ontvangst-transducer alleen net naast de hoofdbundel te zien zijn en deze reflecties een drie maal zo lange looptijd hebben als het rechtstreeks ontvangen signaal, zullen deze reflecties veroorzaakt worden, door het terugkaatsen van de bundel tegen de backing van de transducer en vervolgens tegen het array, waarna het geluid alsnog op het ontvangst-element terecht komt (zie figuur 5.3).

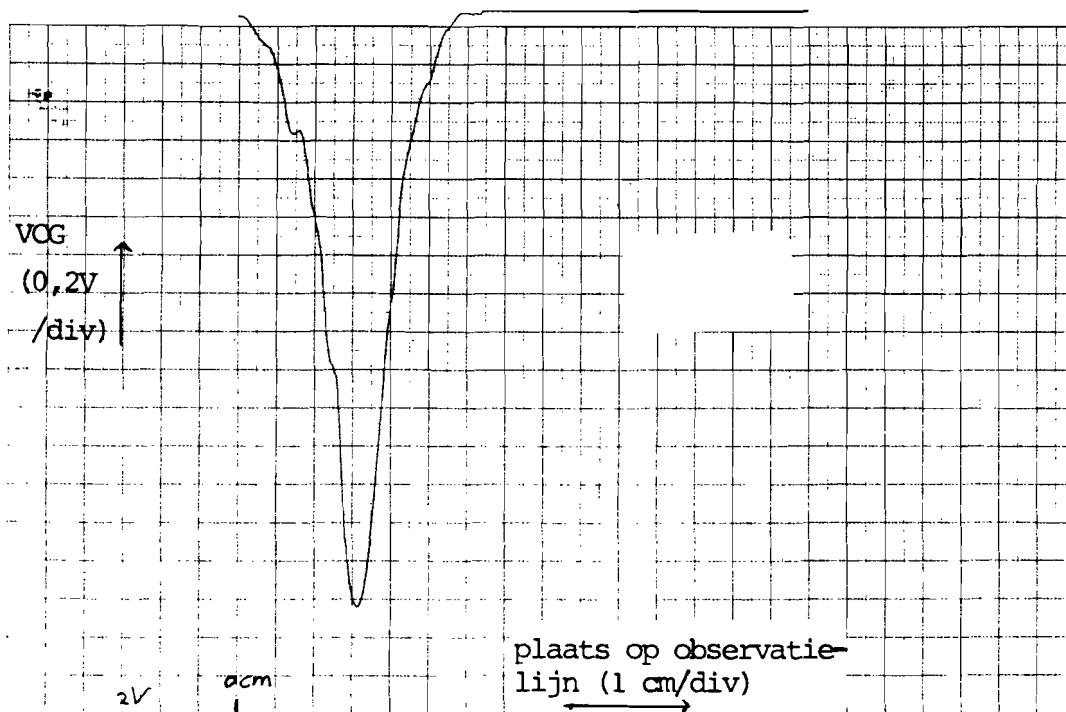


Figuur 5.3

Deze reflecties zijn goed te verminderen door een dempend materiaal (bijvoorbeeld een stukje pannespons) op de backing te plakken. In figuur 5.4 is deze constructie te zien. Tenslotte is in figuur 5.5 een meting te zien waarbij de reflecties voor het grootste gedeelte verdwenen zijn.



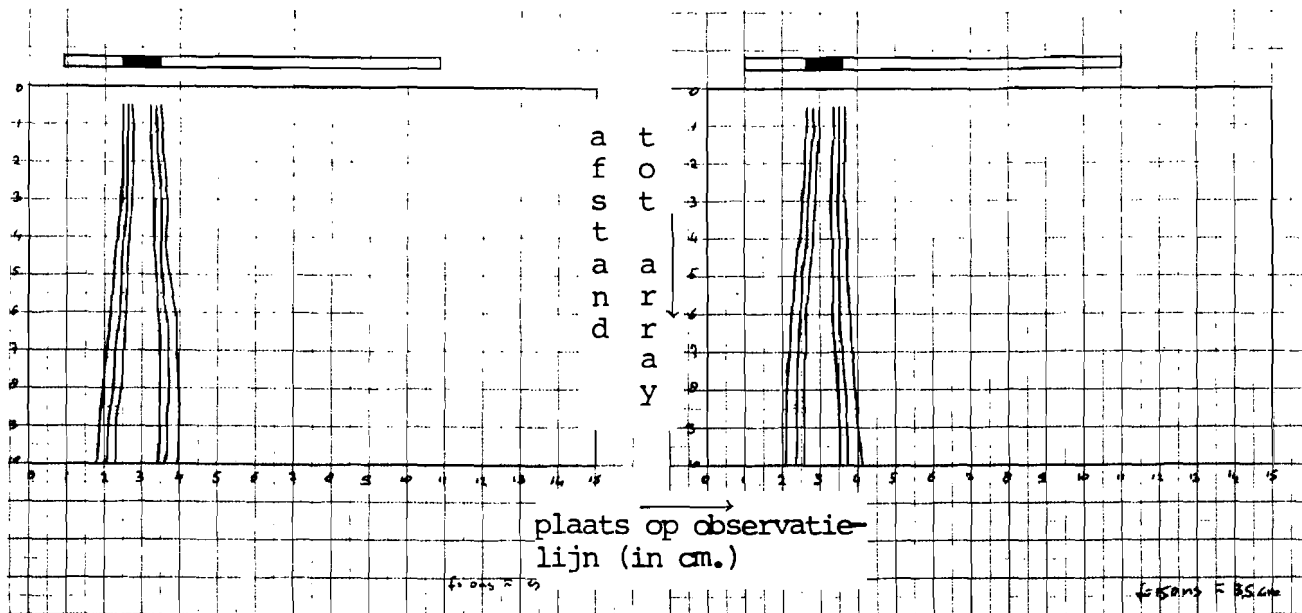
Figuur 5.4



Figuur 5.5

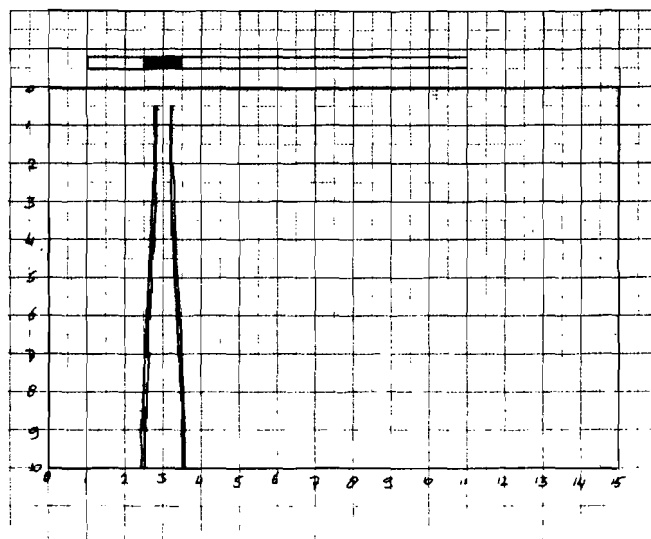
Het uiteindelijke resultaat van de meting aan het array met 8 aangestuurde elementen, is te zien in figuur 5.6. Hier zijn twee metingen te zien, één met het brandpunt ingesteld op 3,5 cm en één meting waarbij de elementen niet zijn gefocusseerd. Het plaatje is als volgt getekend: van de gemeten curves (zoals er in figuur 5.4 een is te zien) worden de -3 dB, -6 dB en -10 dB punten bepaald ten opzichte van het maximum. Deze punten worden vervolgens in een vlak uitgezet, overeenkomstig de werkelijke plaats ten opzichte van het array. Tenslotte worden punten met gelijke (genormeerde) druk door middel van lijnen met elkaar verbonden.

De plaats van het array is in deze figuren aangegeven door een langwerpige rechthoek, waarbij de aangestuurde elementen zijn ingetekend.



Figuur 5.6

Deze twee metingen geven nagenoeg een zelfde bundelvorm. Van het effect van het focuseren (het versmallen van de bundel) is vrijwel niets te zien. In figuur 5.7 zijn de -3 dB lijnen in dezelfde figuur getekend. Nu is het zeer goed te zien, dat beide velden veel op elkaar lijken ("binnenste" : gefocusseerd, "buitenste" : niet gefocusseerd).



Figuur 5.7

5.2 Verschillende mogelijkheden om het veld te verbeteren.

In de vorige paragraaf hebben we gezien, dat focussing met acht elementen niet duidelijk resulteert in een versmalling van de bundel. We zouden echter wel graag enige effect van de focussing zien: als we in een te meten voorwerp de bundel door focuseren smaller kunnen maken, dan zal het oplossend vermogen daar groter worden dan wanneer een niet gefocusseerde bundel gebruikt wordt.

We moeten dus zoeken naar een methode om het effect van de focussing sterker te maken. De literatuur [7] geeft een parameter, waarin de mate van focussing van de bundel uitgedrukt kan worden:

$$K = \frac{D^2}{2 \lambda F} \quad (\text{form. 6.1}) ,$$

met D de apertuur (of breedte van het uitzend oppervlak), λ de golflengte en F de brandpuntsafstand.

Nu geldt, dat een geluidsbundel sterk gefocusseerd genoemd mag worden, wanneer K groter is dan 4; is K kleiner dan 4, dan spreken we van een zwak gefocusseerde bundel. We gaan nu eerst kijken, of de bundel die we in de vorige paragraaf hebben opgemeten, inderdaad zwak gefocusseerd is. Bij acht elementen geldt dan het volgende:

$$\begin{aligned} D &= (7 * 1,27 + 1,02) * 10^{-3} = 9,91.10^{-3} \\ \lambda &= 1480 / 1,5.10^6 = 0,987.10^{-3} \\ F &= 35.10^{-3} \end{aligned}$$

Voor K geldt nu: $K = 1,42$. K is dus duidelijk kleiner dan 4 en de bundel zal dus ook volgens de theorie, zwak gefocusseerd zijn. Om een sterker gefocusseerde bundel te krijgen (hierbij wordt gedacht aan een bundel met een K in de buurt van 4), zal dus iets aan de aansturing moeten veranderen. Uit formule (1) is af te leiden, wat er veranderd kan worden en hoe, om de waarde van K te vergroten.

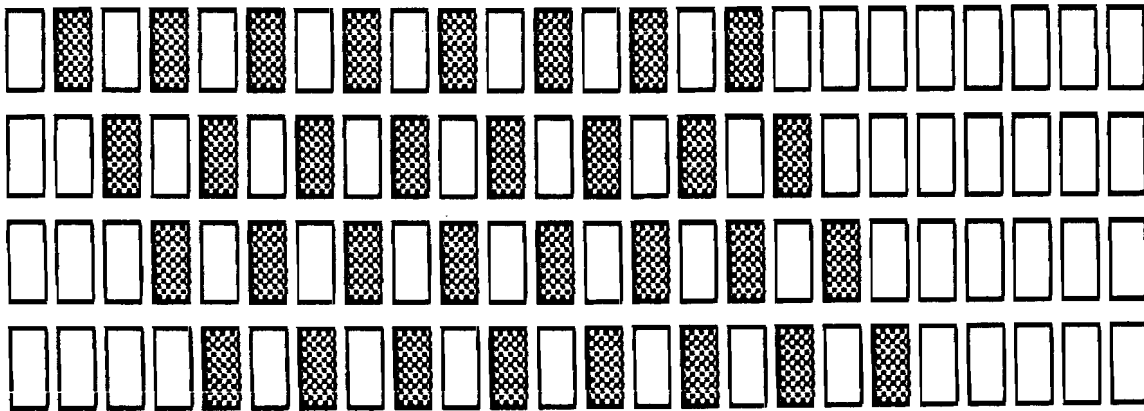
Om te beginnen zou je de golflengte, λ , kunnen verkleinen (dit is dus de frequentie vergroten). Dit echter zou betekenen, dat het array een andere resonantiefrequentie moet krijgen, wat neer komt op het veranderen van de elementen. Hiervoor is het echter nodig een volledig nieuw array te maken. Verder heeft het vergroten van de frequentie tot gevolg, dat het geluid in het object meer gedempt wordt (de damping neemt toe bij hogere frequenties, zie paragraaf 3.2), zodat het ontvangen signaal zwakker wordt.

Het verkleinen van de golflengte valt dus af. Wat nog wel kan, is het verkleinen van de brandpuntsafstand. Echter we willen de brandpuntsafstand juist liever groter hebben, waarbij gedacht wordt aan 50 tot 75 mm (het brandpunt in het te onderzoeken voorwerp).

Het verkleinen van de brandpuntsafstand is dus ook niet mogelijk. Wat ons nu nog rest, is het vergroten van de apertuur. Hieraan zijn geen nadelen gekoppeld die deze oplossing onmogelijk maken en we kunnen deze methode verder gaan bekijken. We gaan er dan vanuit, dat de apertuur ongeveer twee keer vergroot wordt, zodat K een factor vier toeneemt. Als we het brandpunt zouden verplaatsen tot op 50 tot 75 mm, dan komt K tussen 3 en 4 te liggen.

Hoe kunnen we de apertuur vergroten? Hiervoor zijn een aantal mogelijkheden.

- o Om te beginnen kunnen we in plaats van 8 elementen, 16 elementen aansturen.
- o We kunnen ook de elementbreedte vergroten (iets meer dan verdubbelen om een twee keer zo grote apertuur te krijgen).
- o In plaats van het vergroten van de elementbreedte, is het ook mogelijk om twee elementen parallel te schakelen, zodat we een schijnbare verbreding van de elementen krijgen.
- o Ten slotte kunnen we de elementen om en om aansturen (zie figuur 5.8).



Figuur 5.8

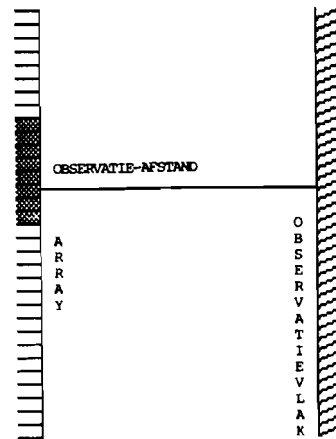
In de volgende paragraaf zal blijken, dat bij dit om en om aansturen vrij grote zijlobben ontstaan; groter dan bij verbreding van de elementen. Om dit verschijnsel te onderdrukken, is ook nog bekeken wat voor effect het zou hebben, als, bij het om en om aansturen, de niet aangestuurde elementen een klein beetje mee gaan trillen. Dit gebeurt altijd wel wat, bijvoorbeeld door mechanische en/of elektrische koppeling. Echter ook door zelf de elementen te koppelen, bijvoorbeeld met weerstanden, kunnen de tussenliggende elementen in trilling worden gebracht. Deze koppeling tussen de elementen, blijkt een schijnbare verbreding van de elementen tot gevolg te hebben (zoals in de volgende paragraaf te zien is), zodat de zijlobben kleiner worden.

Om nu te kijken welke methode de beste resultaten geeft, is gebruik gemaakt van een simulatieprogramma (zie hoofdstuk 7). Het meten van het veld is helaas niet mogelijk gebleken, doordat het array niet in al te beste staat bleek te zijn. In de volgende paragraaf zullen de verschillende velden, die met het huidige array in principe mogelijk zijn, bekeken worden. (Dit houdt dus in, dat de methode met bredere elementen niet expliciet ter sprake komt, mede omdat de resultaten vergelijkbaar zijn met het twee aan twee parallel schakelen van de elementen.)

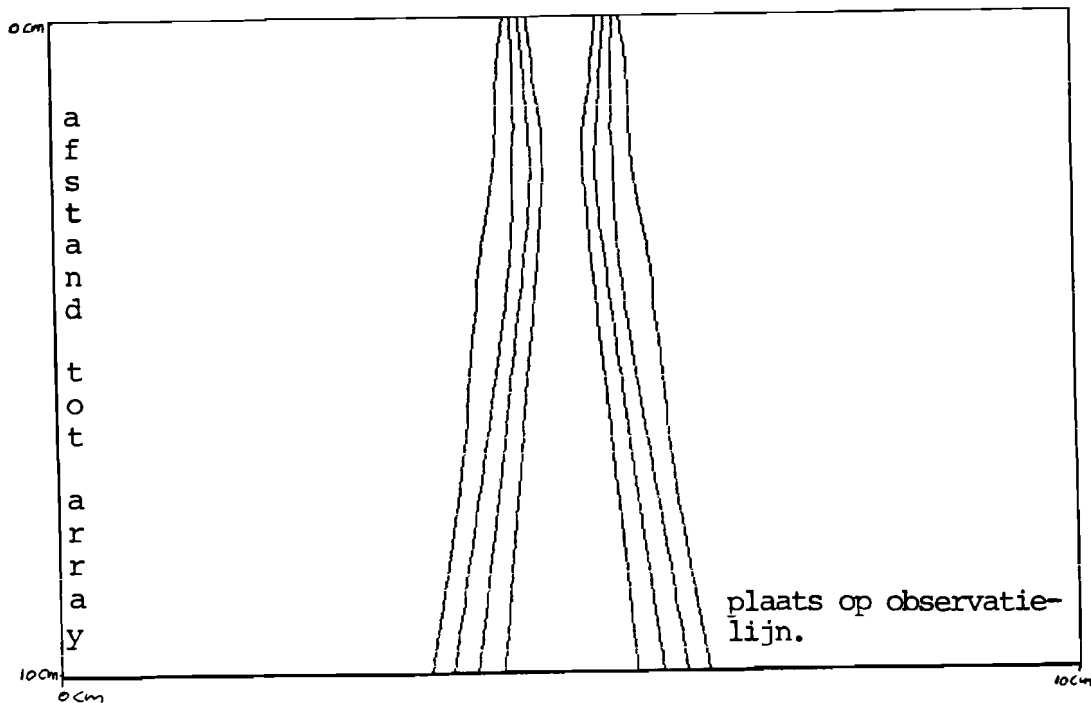
5.3 De ultrasone velden bij de verschillende mogelijkheden.

De velden die in deze paragraaf te zien zijn, zijn verkregen door middel van een simulatieprogramma. Dit programma, dat in hoofdstuk 7 ter sprake zal komen, berekent de relatieve druk (zie § 7.2) over een lijn, parallel aan het array en op een bepaalde afstand van dat array (zie figuur 5.9). Het resultaat van zo'n simulatie is dus te vergelijken met de metingen in paragraaf 5.1. (zie ook figuur 5.10).

Om informatie te krijgen over het hele veld (een gebied van 10 bij 15 cm.) worden deze drukfuncties op een aantal verschillende afstanden van het array berekend. De afstanden die hier zijn gebruikt liggen tussen 0,5 en 15 cm, met stappen van 0,5 cm. Op de berekende lijn wordt om de millimeter de druk berekend.



Figuur 5.9



Figuur 5.10

Omdat het nogal moeilijk is om inzicht in het veld te krijgen uit 30 alleenstaande curves, zijn deze lijnen op twee manieren verwerkt, zodanig dat het veld snel en duidelijk is te overzien. De eerste manier, die in de plaatjes steeds linksboven is getekend, is het drie-dimensionaal tekenen van de curves. Het drukveld wordt hierbij opgevat als een soort heuvelandschap. Door nu vanuit een bepaalde hoek hier tegenaan te kijken - en dit dan op tekenen - zijn hoofd- en zijbundels snel te zien.

De tweede manier om de curves te verwerken, is dezelfde als in de paragraaf 5.1 is gebruikt om de meetresultaten uit te zetten. Het simulatieprogramma genereert nl. een aantal drukfuncties, berekend op een bepaalde afstand van het array. Van deze drukfuncties kunnen de -3, -6, -10, -15, -20, -25 en -30 dB punten (ten opzichte van het maximum van de desbetreffende drukfunctie) bepaald worden. Door van al deze drukfuncties de punten met gelijke waarden door middel van een lijn te verbinden, ontstaat een plaatje, dat te vergelijken is met een isobaren-plaatje (alleen zijn hier geen lijnen getekend die punten met absolute gelijke druk verbinden, maar punten met een op een speciale manier genormeerde gelijke druk).

In de rest van het verslag zullen deze plaatjes 'isobaren-plaatjes' genoemd worden.

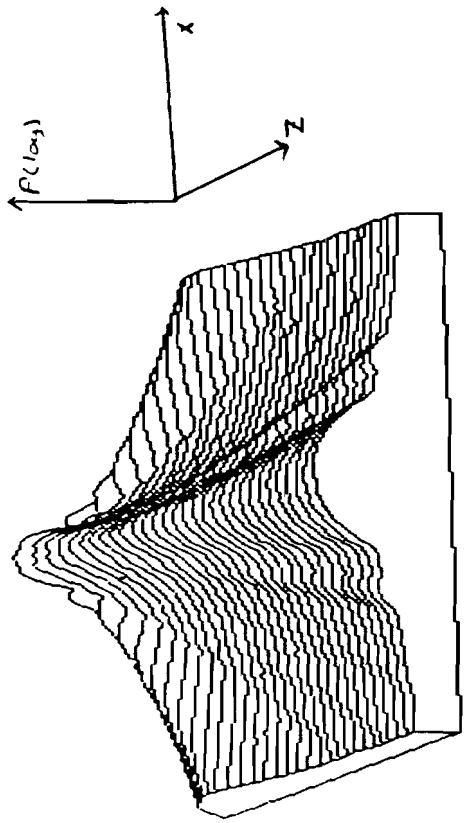
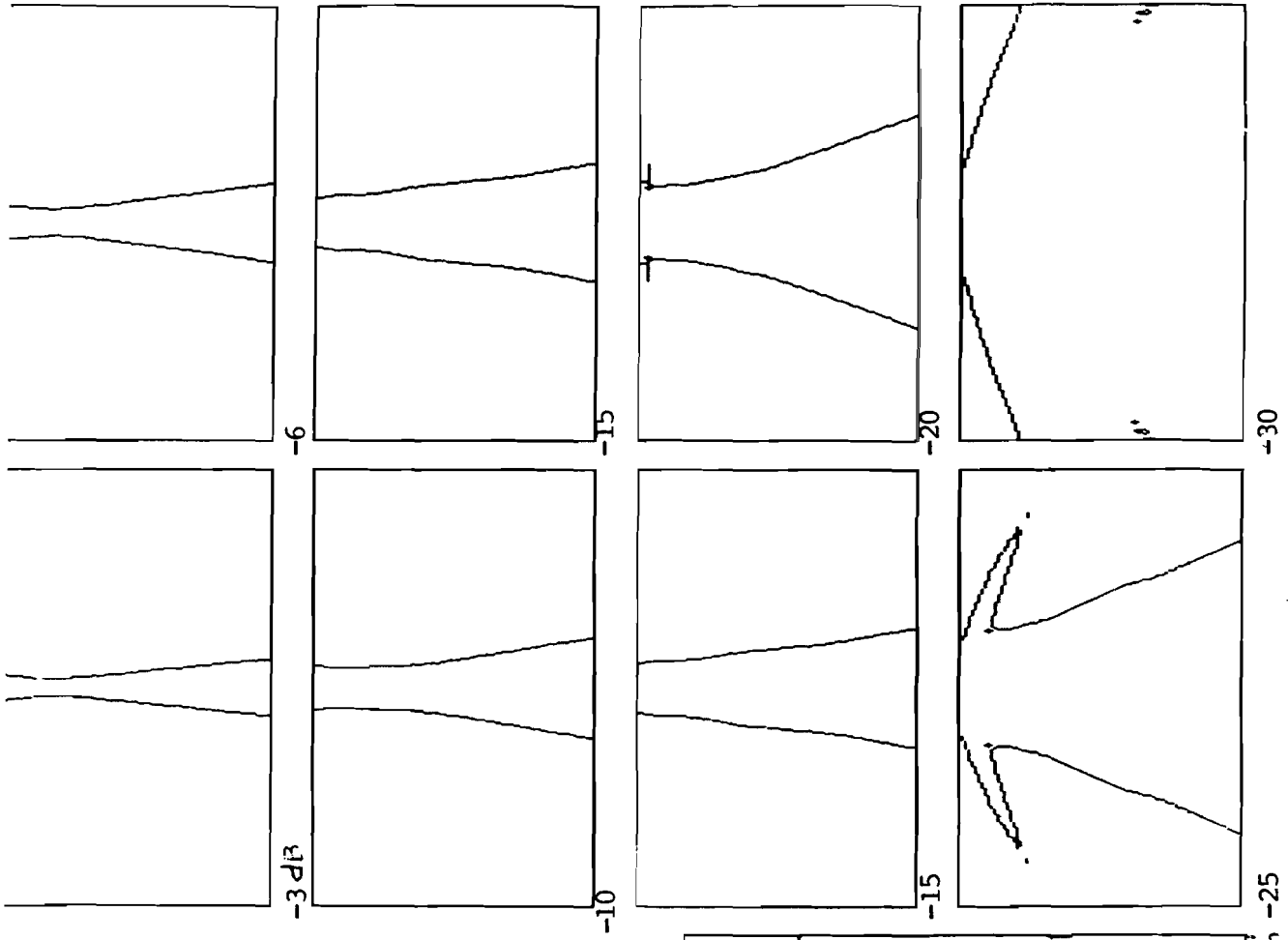
De getekende plaatjes zijn niet op schaal getekend, maar zo, dat een maximaal oplossend vermogen wordt bereikt. De werkelijke afmetingen zijn nl. 10 bij 15 cm. In deze plaatjes bevindt het array zich altijd aan de bovenkant.

Op de volgende pagina's is linksonder een volledig isobarenplaatje getekend, met lijnen door -3, -6, -10, -15, -20, -25 en -30 dB. Rechts zijn plaatjes getekend met slechts één isobaar. Deze kunnen gebruikt worden, om de waardes behorende bij de isobaren uit het linkse plaatje te achterhalen: het bij de lijnen schrijven van de bijbehorende waardes maakt het plaatje niet altijd even overzichtelijk.

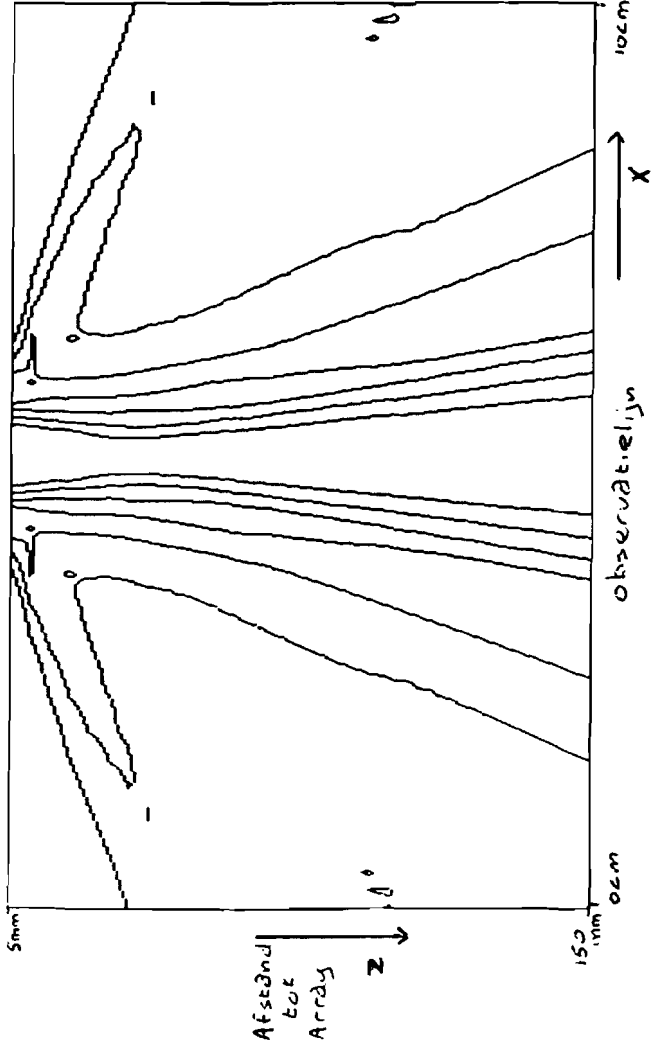
In de figuren op de volgende pagina's zijn velden getekend die op de volgende manieren zijn verkregen:

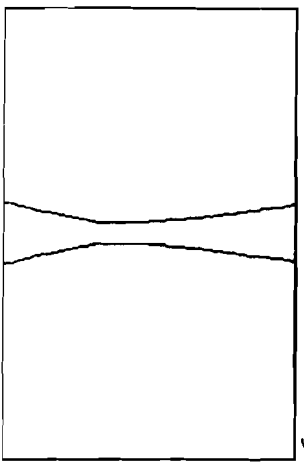
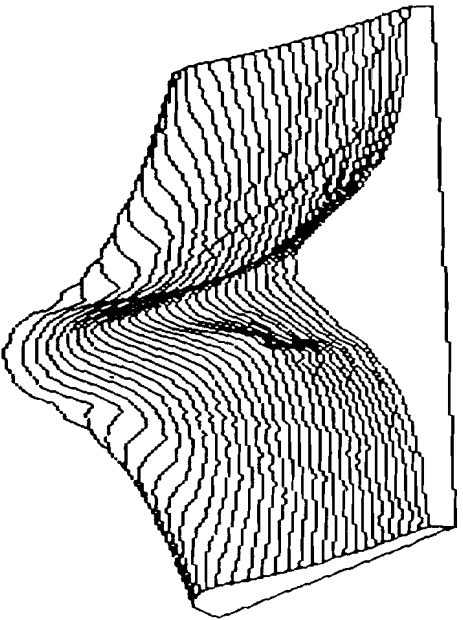
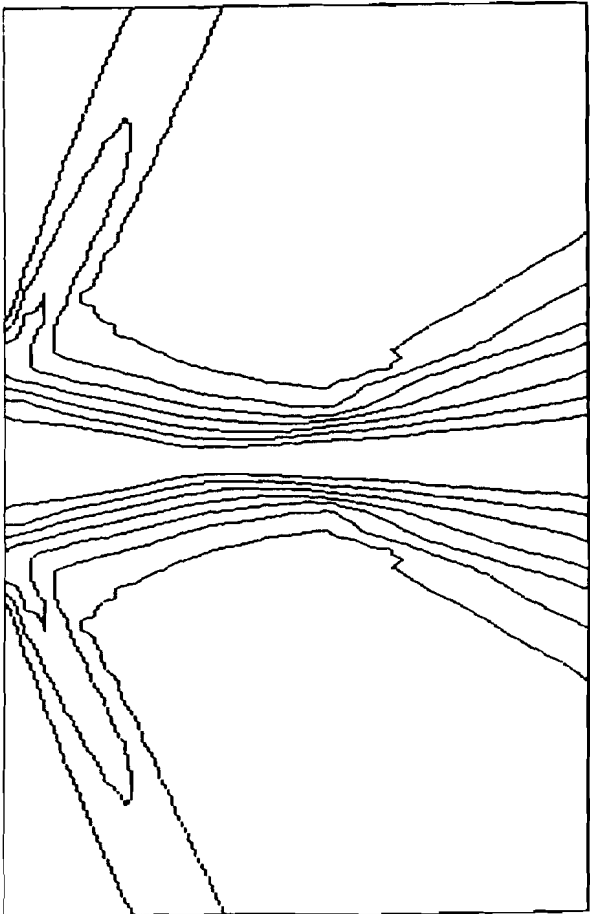
- pagina 42: aansturing van acht naast elkaar gelegen elementen.
- pagina 43: aansturing van zestien naast elkaar gelegen elementen.
- pagina 44: aansturing van zestien elementen, met elementen twee aan twee parallel geschakeld.
- pagina 45: aansturing van acht elementen om-en-om, geen koppeling.
- pagina 46: aansturing van acht elementen om-en-om, koppelfactor 10% tussen de elementen.
- pagina 47: aansturing van acht elementen om-en-om, koppelfactor 20% tussen de elementen.

Alle velden zijn 15 cm lang (z-richting) en 10 cm breed (x-richting). De array's zijn zo aangestuurd, dat het brandpunt op 7,5 cm ligt.

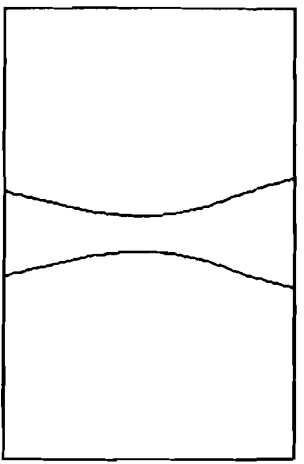


-40-

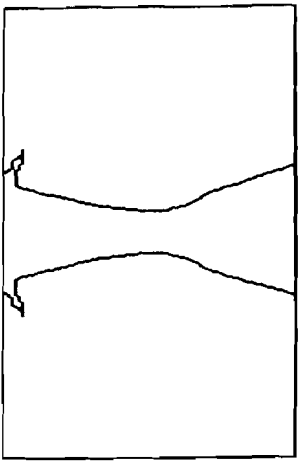




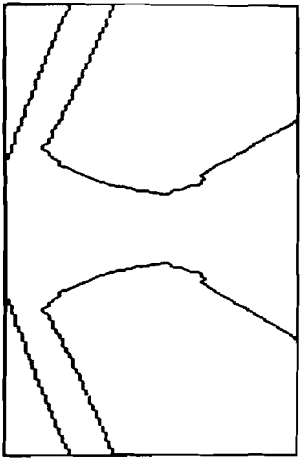
-6



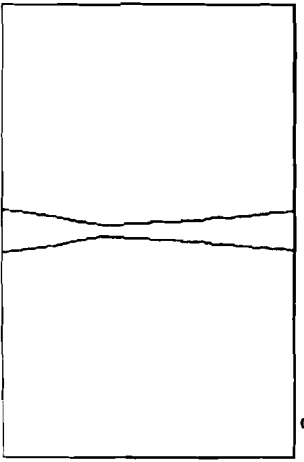
-15



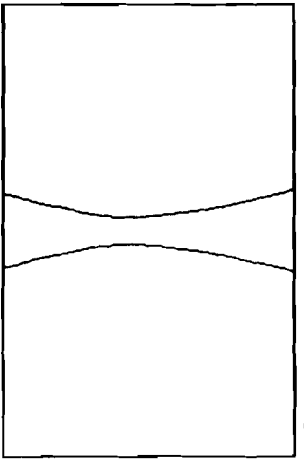
-20



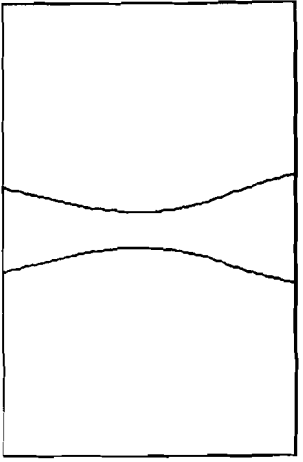
-30



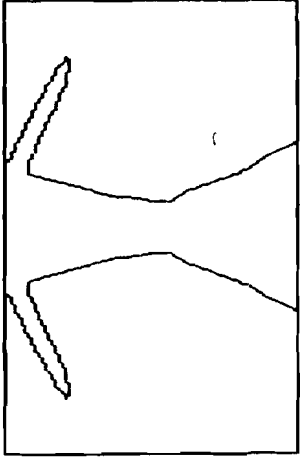
-3



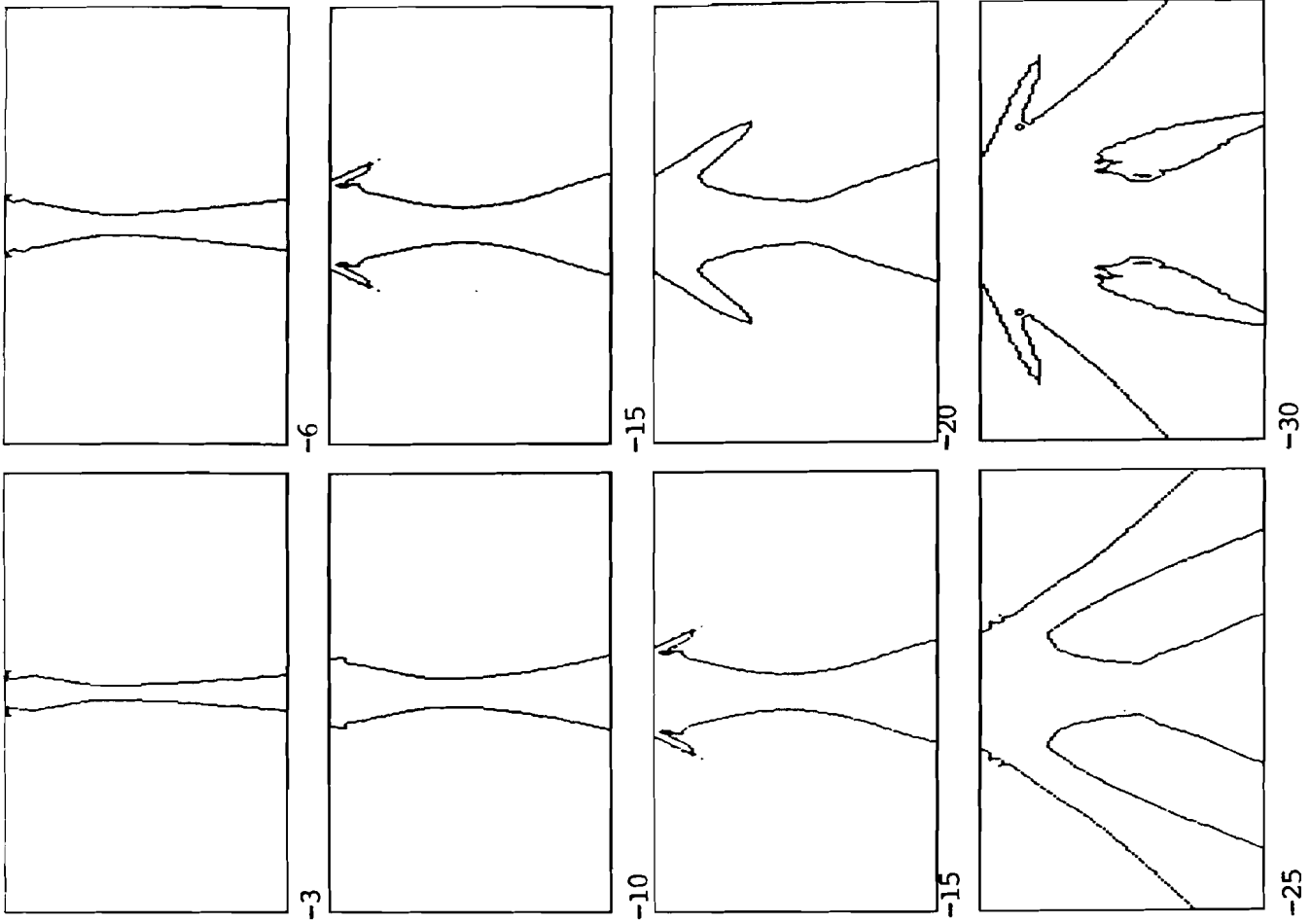
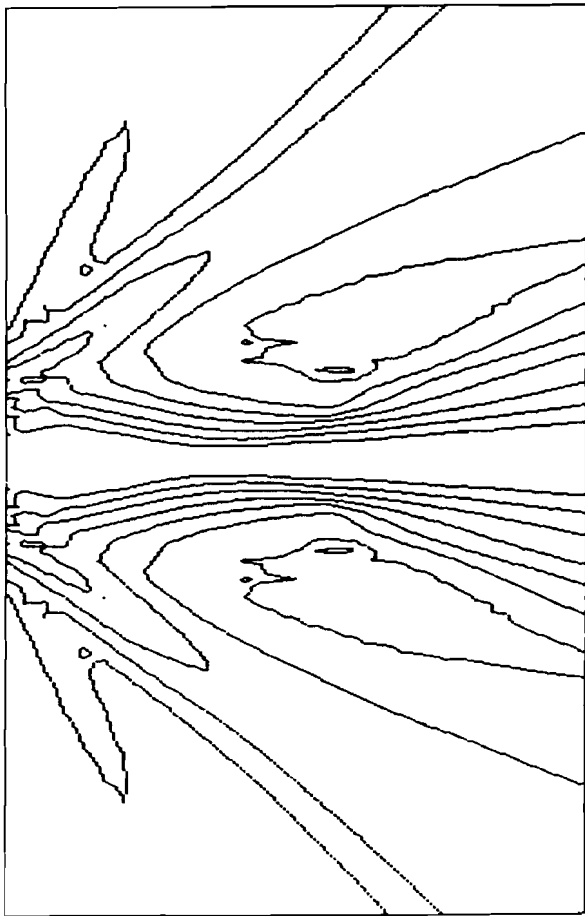
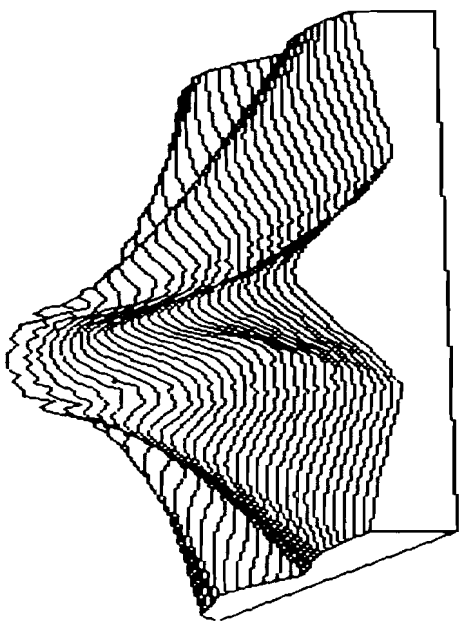
-10

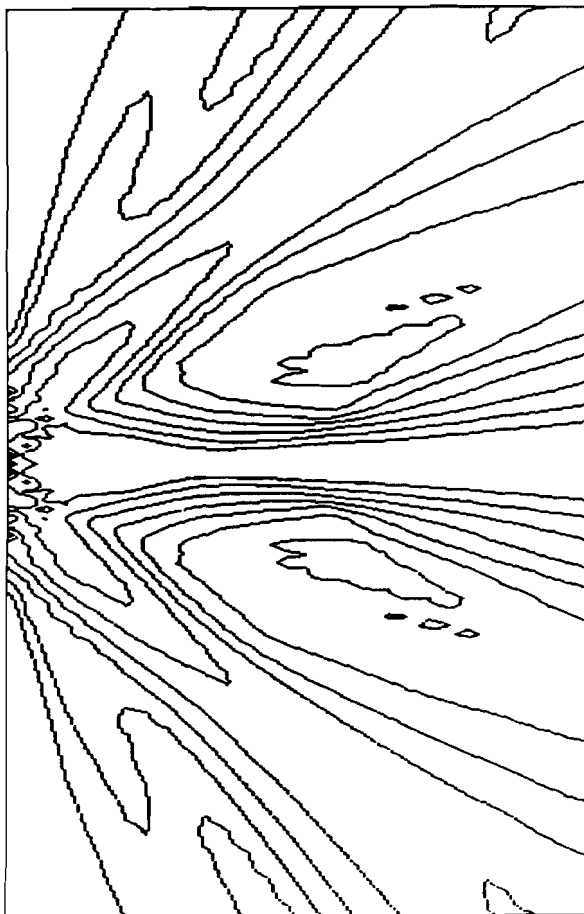
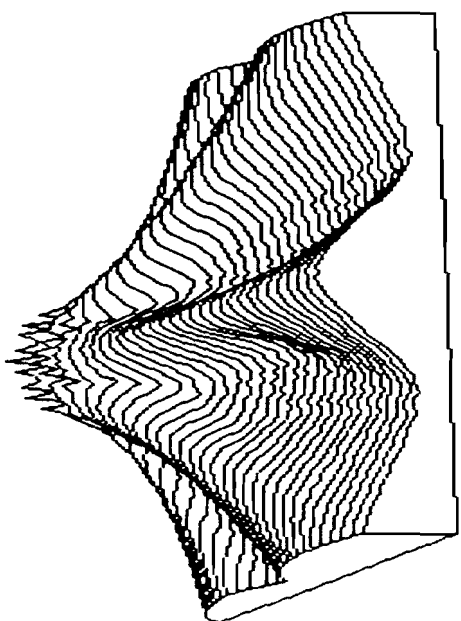
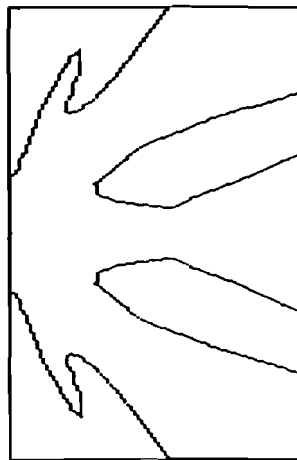
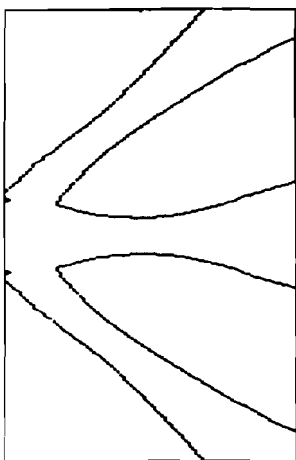
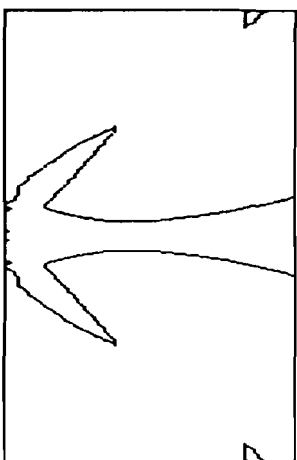
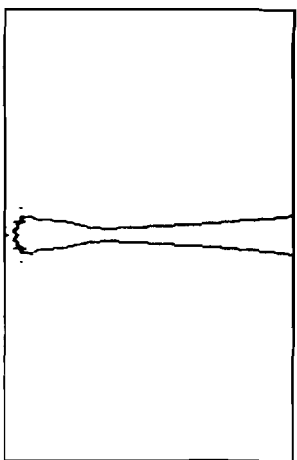
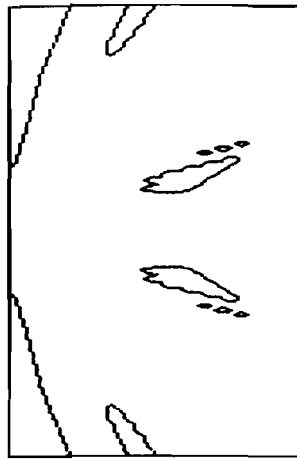
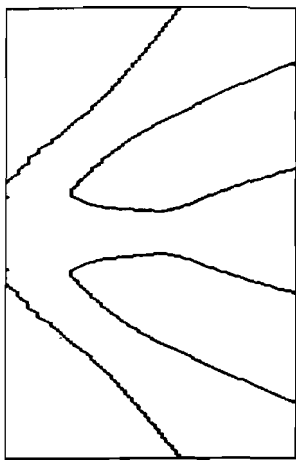
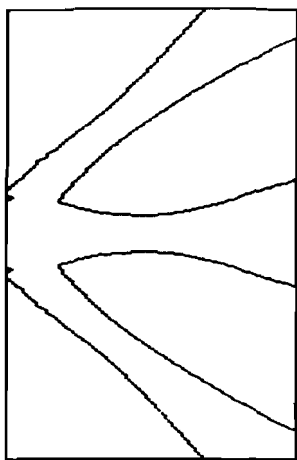
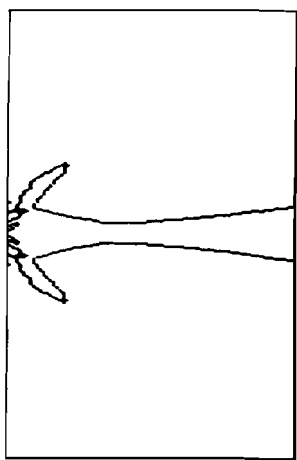


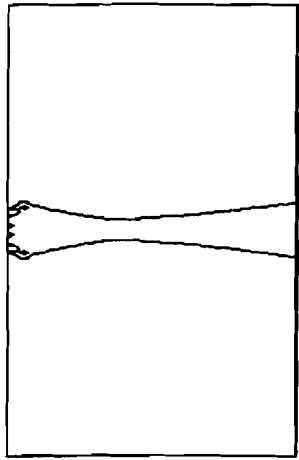
-15



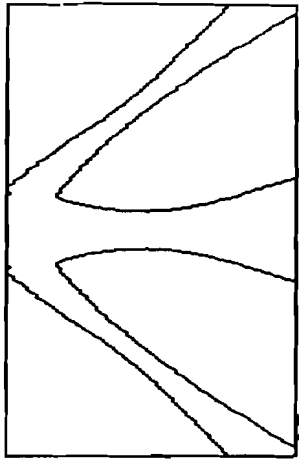
-25



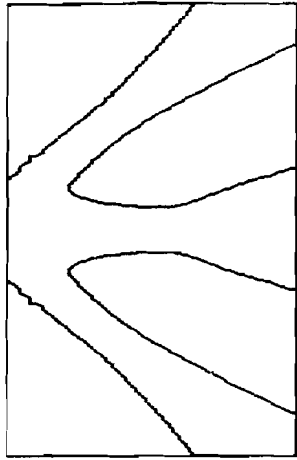




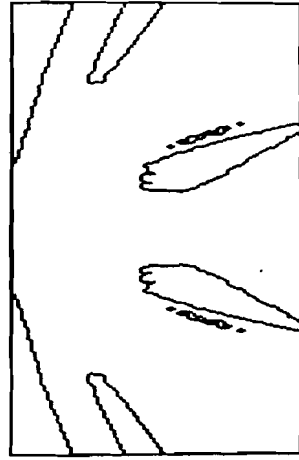
-6



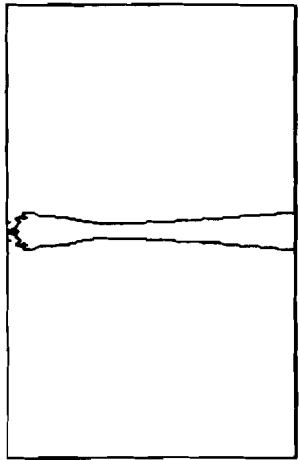
-15



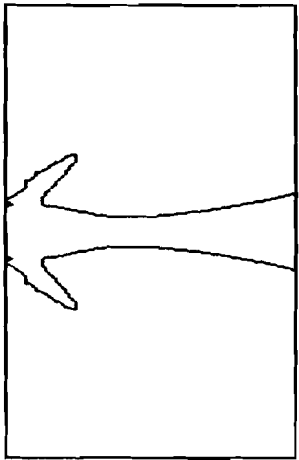
-20



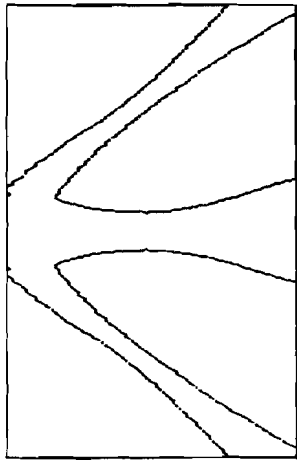
-30



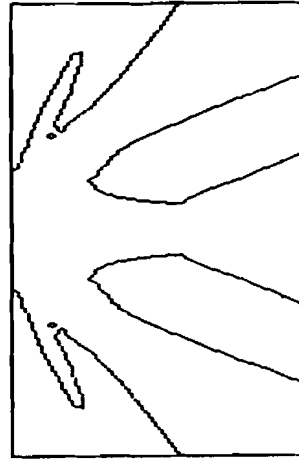
-3



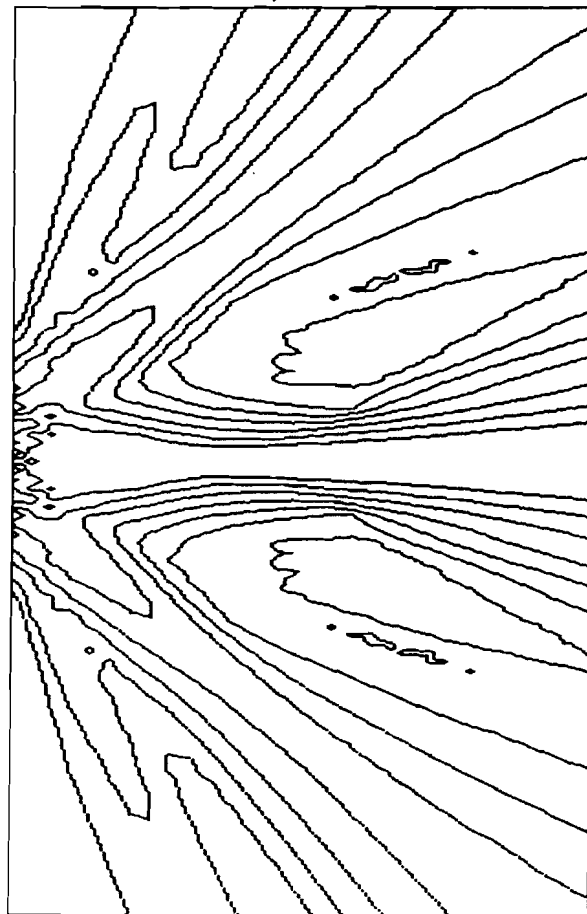
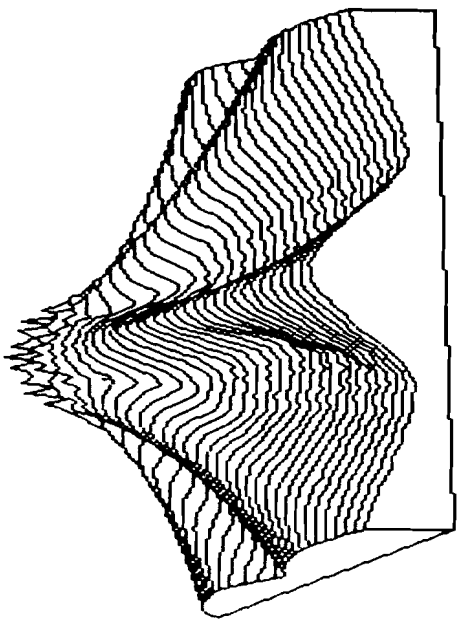
-10

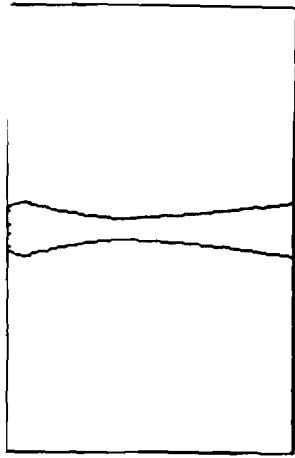


-15

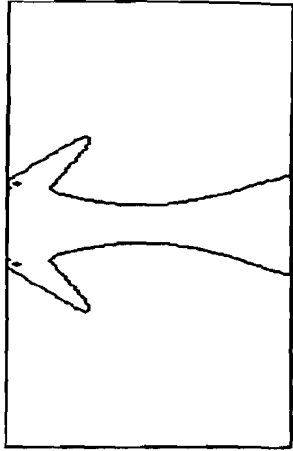


-25

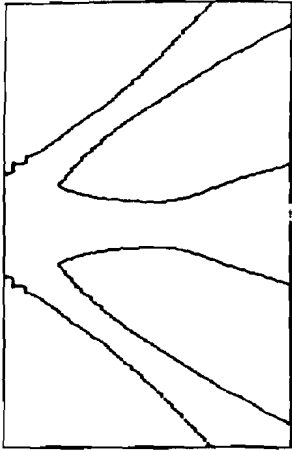




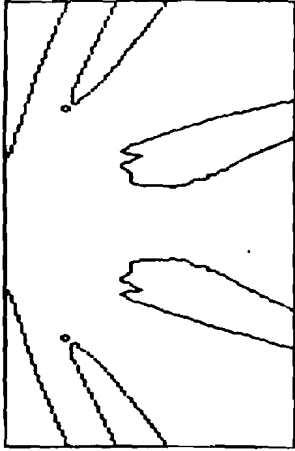
-6



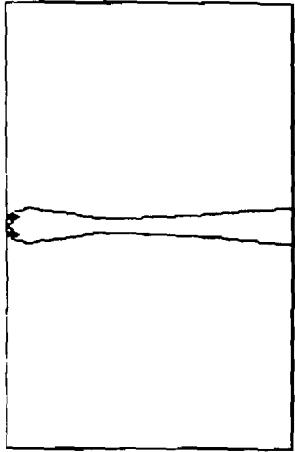
-15



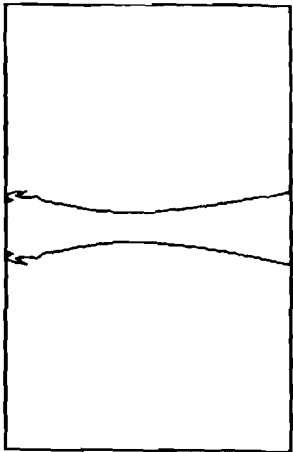
-20



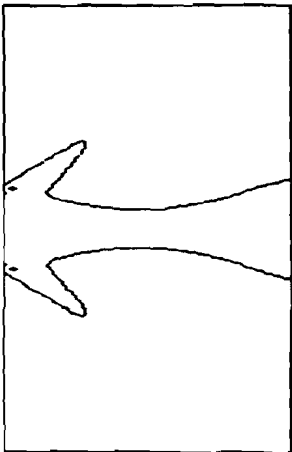
-30



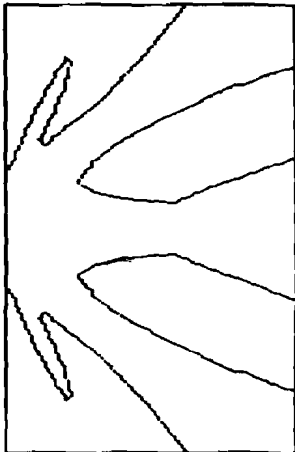
-3



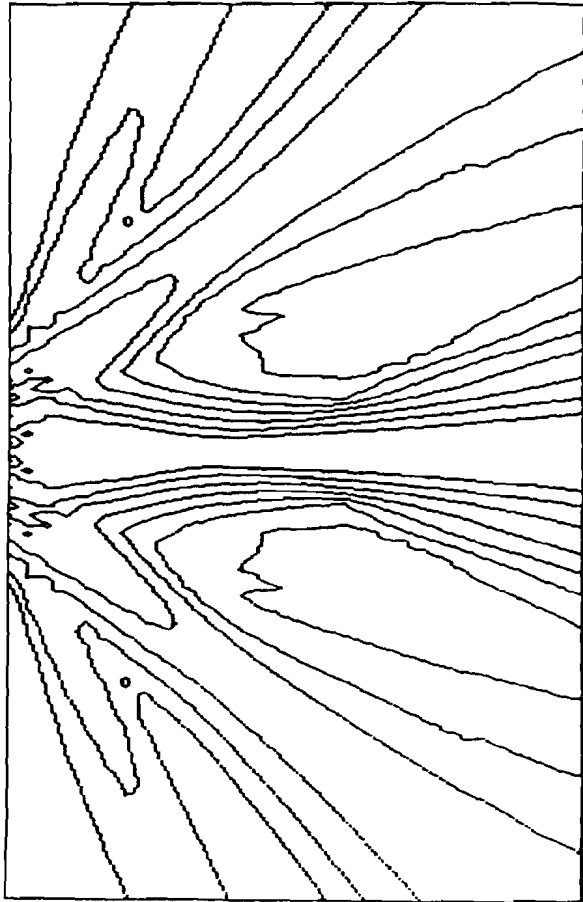
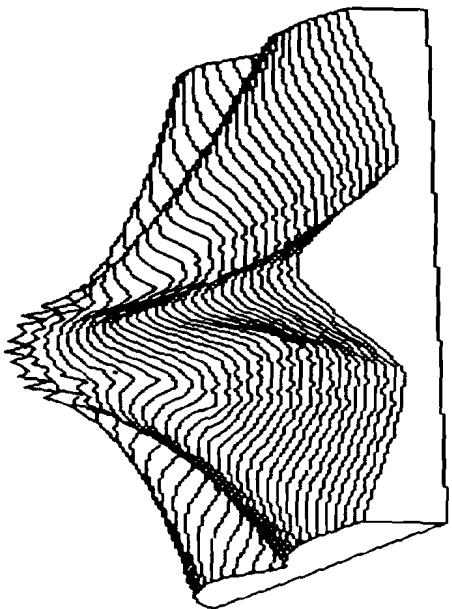
-10



-15



-25



Op de vorige pagina's hebben we de velden gezien, die ontstaan bij de verschillende aansturingen. De vraag rijst nu, welke aansturing we nu het beste kunnen gebruiken. Om hier een antwoord op te geven, moeten we enigszins subjectief te werk gaan. Het is nl. erg lastig om precies te zeggen, hoeveel een bepaald veld 'beter' is dan een ander veld. Verder is het ook moeilijk te bepalen hoeveel een bepaalde schakeling 'complexer' is dan een andere; we kunnen hier echter wel kijken naar de plaats die een bepaalde schakeling inneemt.

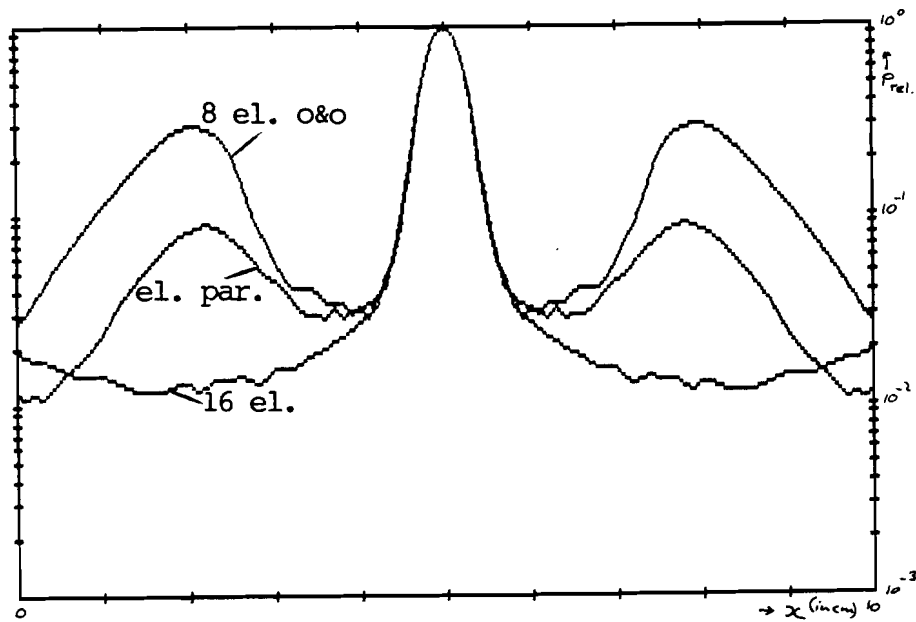
Het zal duidelijk zijn, dat het veld, dat verkregen is door 16 elementen aan te sturen, er het beste uit ziet (vrijwel geen zijlobben en vrij goed resultaat van de focussering). Het probleem bij het gebruik van 16 elementen is echter, dat de elektronica vrij omvangrijk gaat worden: sommige delen van de elektronica verdubbelen in omvang, andere delen verviervoudigen ten opzichte van de acht elements aansturing (zie paragraaf 6.3).

Kijken we naar het veld met parallel geschakelde elementen, dan zien we dat er zijlobben verschijnen, die het veld minder mooi maken. Echt hinderlijk zullen deze zijlobben waarschijnlijk niet zijn. De hoofdbundel blijft er echter net zo uitzien als bij de 16-elements aansturing. De elektronica die nodig is om deze aansturing te realiseren, wordt nauwelijks uitgebreider dan bij een 8-elements aansturing. De enige toename van de elektronica vindt vlak bij het array plaats. Al met al is deze oplossing goed toe te passen.

Bij de om en om aansturing lijkt het veld erg veel op het vorige veld. Het enige dat wezenlijk anders is, is de grootte van de zijlobben. Deze zijn nu zo groot, dat ze hinderlijk zouden kunnen worden. In hoeverre er echt last van wordt ondervonden is pas te zeggen, als het veld in de praktijk wordt opgemeten. De elektronica, die voor deze aansturing nodig is, is vrijwel identiek aan de 8-elements aansturing. Dit maakt deze methode toch wel erg aantrekkelijk.

In figuur 5.11 zijn voor bovengenoemde mogelijkheden, drie gesimuleerde drukcurves, steeds op dezelfde afstand van het array, door elkaar geschreven. Hierin is te zien, dat de hoofdlob

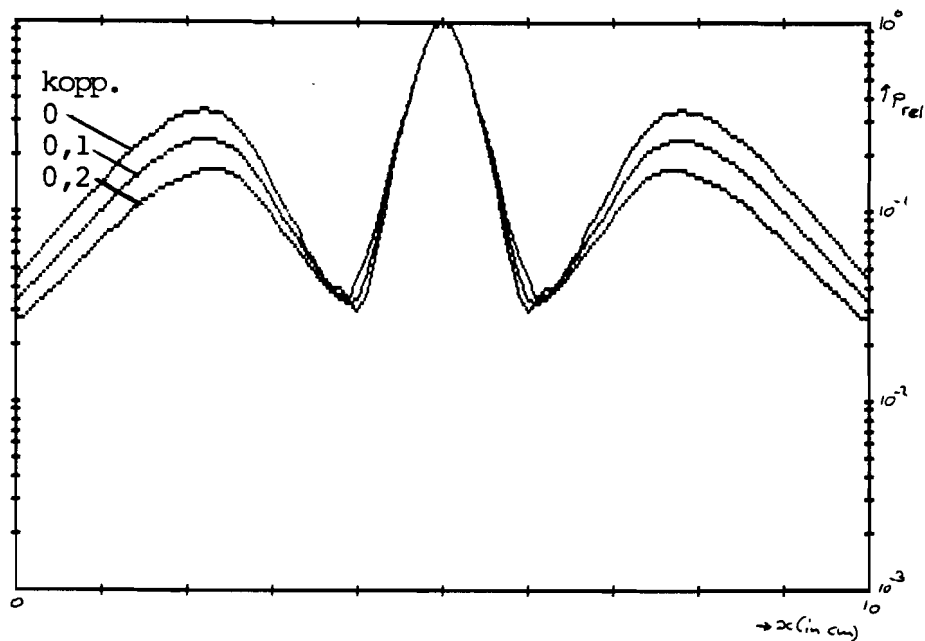
bij alle mogelijkheden vrijwel gelijk is.



Figuur 5.11

Om te kijken of de zijlobben in de praktijk ook inderdaad zo groot zijn als hier is gesimuleerd, kan alleen een meting uitkomst bieden. We kunnen wel kijken wat er gebeurt, als er overspraak plaatsvindt tussen de elementen (zoals op het einde van paragraaf 5.2 al is vermeld). Als buurelementen enigszins met elkaar gekoppeld zijn, dan zullen niet aangestuurde elementen toch een gedeelte van het signaal van hun linker- als en hun rechter-buurman uitzenden. In een programma is dit goed te simuleren. In de plaatjes op de vorige pagina's zijn dan ook twee simulaties, waarbij een koppeling tussen elementen wordt verondersteld. In het ene plaatje zendt een niet aangestuurd element 1/10 deel uit van het signaal van zijn burens en in het andere plaatje 2/10 deel.

Zoals in figuur 5.12 te zien is, worden de zijlobben, bij sterkere koppeling tussen de elementen, steeds kleiner. Als de koppeling toeneemt, gaan de velden steeds meer lijken op de velden waar de elementen twee aan twee parallel zijn geschakeld. Deze toenemende gelijkenis komt, omdat bij koppeling tussen elementen de breedte van de elementen toe lijkt te nemen (zie lit. [6,11,12]).



Figuur 5.12

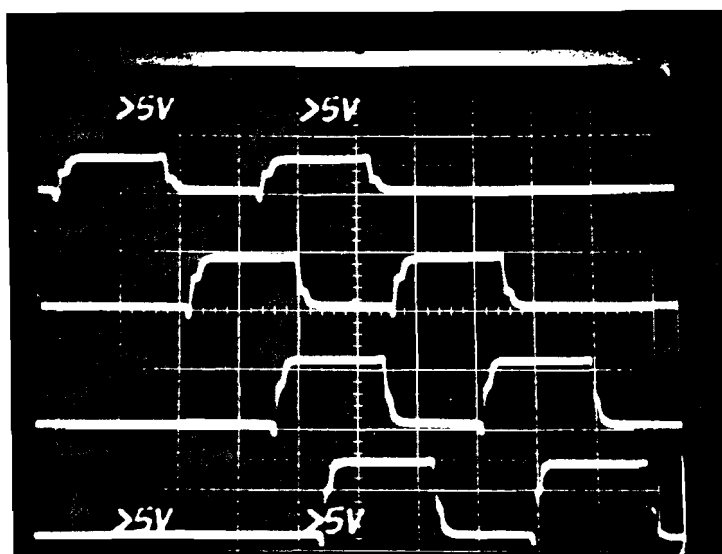
Nu zal een keuze gemaakt moeten worden, welke aansturing het beste gebruikt kan worden. Omdat verwacht mag worden, dat de zijlobben bij de om en om aansturing in de praktijk mee zullen vallen en omdat de elektronica bij deze aansturing nagenoeg gelijk is aan de B-elements aansturing, waardoor uitwisselen van de twee verschillende aansturingen zeer eenvoudig is, kan het beste voor de om en om aansturing gekozen worden, als een verbetering van het effect van de focussing gewenst is.

6. De gebruikte elektronica

In het vorige hoofdstuk hebben we gezien, dat er een aantal verschillende manieren zijn, om het array aan te sturen. In dit hoofdstuk zal de elektronica besproken worden, waarmee acht naast elkaar gelegen elementen aangestuurd kunnen worden en waarmee gescand kan worden. Tegen het einde van dit hoofdstuk zal bekeken worden, wat er aan deze elektronica veranderd zou moeten worden, om een andere aansturing te krijgen.

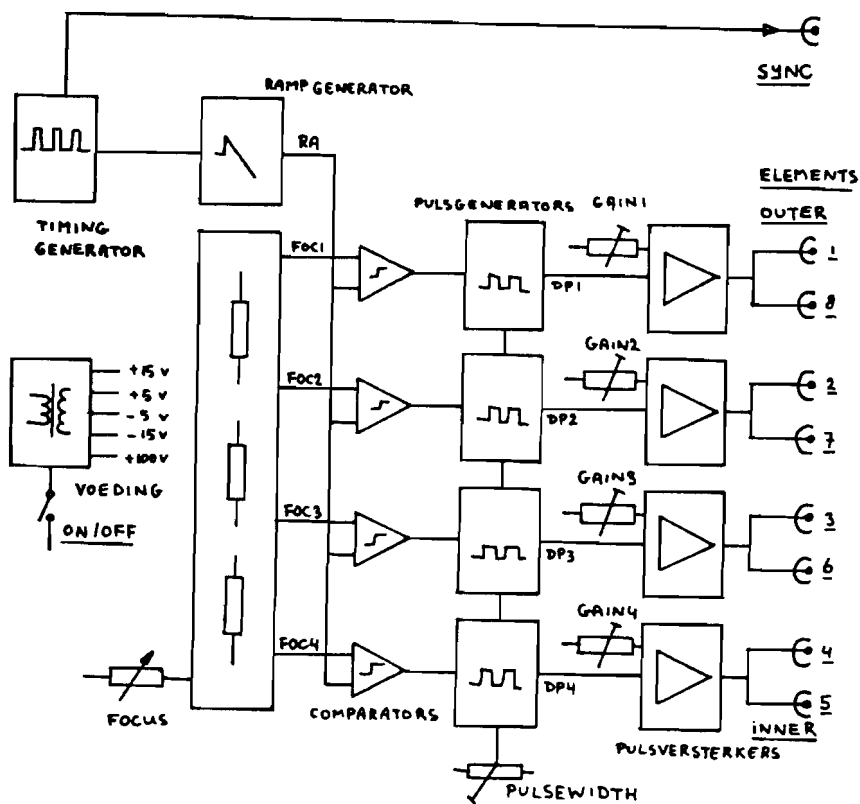
6.1 De zendelektronica.

Om acht elementen van het array aan te sturen, worden vier dubbelpulsen gebruikt, die ten opzichte van elkaar in de tijd verschoven kunnen worden en waarvan de amplitude los van elkaar is in te stellen. In figuur 6.1 is een voorbeeld van deze dubbelpulsen te zien (horizontale schaalverdeling : 200 ns/div).

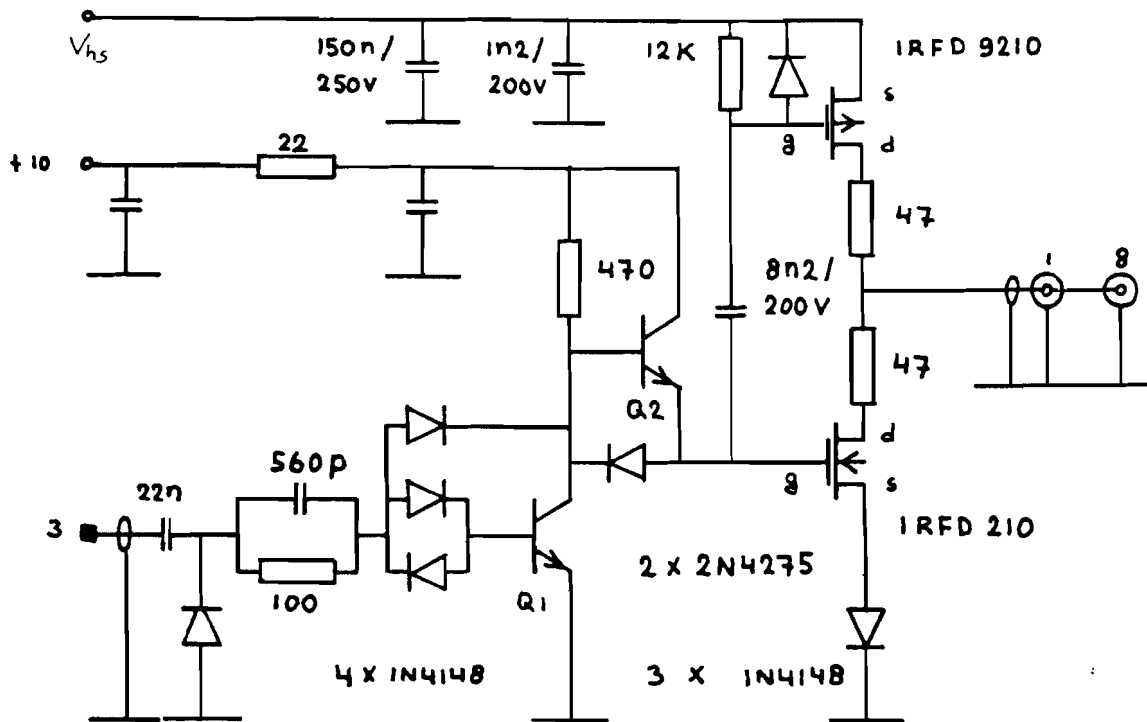


Figuur 6.1

De schakeling die deze zendpulsen genereert, de Lineaire Array Transmitter (LAT), waarvan in figuur 6.2 een blokschema is te zien, is gebouwd en beschreven door Peter Wardenier [17]. De LAT zal daarom hier niet volledig besproken worden; alleen de eindversterkers krijgen wat meer aandacht, omdat deze de hoogspanningspulsen leveren, die door de scanelektronica over het array verdeeld moeten worden. In figuur 6.3 is het schema van een eindversterker te zien, zoals die in de LAT is gebruikt.



Figuur 6.2



Figuur 6.3

In het eerste gedeelte van de versterker (t/m transistor Q2), wordt de binnenkomende puls van TTL niveau omgezet naar het in de schakeling gebruikte +10V niveau. De combinatie van Q1 en Q2 zorgt ervoor, dat de flanken van de pulsen steil genoeg zijn, voordat de pulsen aan de FET's worden doorgegeven.

In rust (laag ingangsniveau) zal Q1 gesperd zijn en Q2 in geleiding. De spanning op de gate van de N-kanaals FET (IRFD 210) zal ca. 10 Volt zijn, waardoor deze in geleiding zal staan; de gate van de P-kanaals FET (IRFD 9210) zal door de 12 K weerstand op dezelfde potentiaal staan als zijn source, waardoor deze FET gesperd zal zijn.

Wanneer nu op de ingang van de versterker een puls binnen komt, dan zal Q1 snel in geleiding komen, waardoor Q2 vrijwel direct zal gaan sperren. Op de emitter van Q2 zal nu een negatieve spanningsprong ontstaan van ca. -9 V. Hierdoor zal de gate van de N-kanaals FET op ca. 1 V komen staan, waardoor deze FET zal sperren; op de gate van de P-kanaals FET zal door de 8n2

condensator ook een negatieve spanningssprong verschijnen, waardoor de gate-source spanning van deze FET ca. -9 V zal worden en de FET in geleiding zal komen. Op de uitgang van de versterker zal nu ook een puls verschijnen met als amplitude de voedingsspanning U_{hs} .

Als de ingang weer van een hoog naar een laag niveau gaat (op het einde van een puls), dan speelt zich het omgekeerde af. Q1 zal weer (snel) gaan sperreren, Q2 komt weer in geleiding, evenals de N-kanaals FET, en de P-kanaals FET zal weer gaan sperreren, omdat de gatespanning door de condensator weer ca. 9 V hoger wordt gebracht.

Nog een paar opmerkingen over de schakeling. De diodes rond Q1 en Q2 zijn aangebracht om het in verzadiging raken van de twee transistoren (waardoor deze minder snel zouden schakelen) tegen te gaan. De diode in de source leiding van de N-kanaals FET is aangebracht, als compensatie voor de diode in de emitter leiding van Q2, zodat de gate-source spanning van deze FET bijna 0 V kan worden. De diode bij de P-kanaals FET is aangebracht om deze FET te beschermen tegen positieve gate-source spanningen en om sneller een tweede puls te kunnen verwerken.

Verder kunnen de FET's geen gate-source spanningen groter dan 20 V verdragen. Bij de N-kanaals FET zal de gate-source spanning niet makkelijk groter worden dan 10 V , echter de P-kanaals FET kan hieraan wél blootgesteld worden. Als de voedingsspanning U_{hs} plotseling snel oploopt, dan zal de gate van de FET deze verandering, door het RC-netwerkje rond zijn gate, niet kunnen volgen. Bij het opvoeren van de U_{hs} voedingsspanning dient hiermee dan ook altijd rekening te worden gehouden.

6.1.1 De elementschakelaars.

In paragraaf 4.2 hebben we gezien, waaraan het scannen moet voldoen. Van alle elementen van het array moeten er slechts acht worden aangestuurd (van zendpulsen worden voorzien); de overige elementen mogen geen zendpulsen krijgen. Verder krijgen de acht aangestuurde elementen niet allemaal dezelfde zendpulsen: door focusering en apodisatie hebben we te maken met vier verschillende zendpulsen. In deze paragraaf zal nog echter weinig aandacht worden besteed aan de gevolgen voor de elektronica als we scannen met behoud van focusering en apodisatie. We gaan er hier voor het gemak van uit, dat alle acht aangestuurde elementen verschillende zendpulsen nodig hebben en dat we daarom beschikken over acht verschillende versterkers. In de volgende paragraaf zal worden besproken hoe deze "versterkers" gerealiseerd worden.

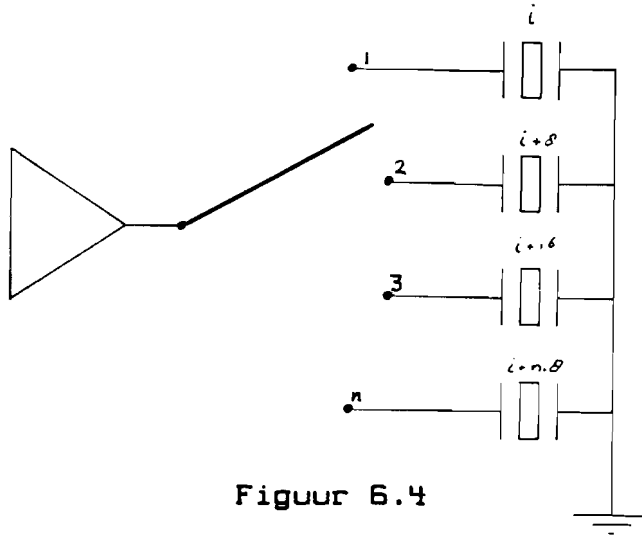
Om te beginnen nemen we de LAI als een vast gegeven, waar we niets meer aan veranderen (in paragraaf 6.1.3. zal uitgelegd worden, waarom de LAI ongewijzigd is gebleven). Bij het array zal wel het een en ander aangepast moeten worden. Zou namelijk alle elektronica buiten het array blijven, dan zouden zo'n honderd afgeschermdde kabels nodig zijn, om de elementen met de elektronica te verbinden en van zendpulsen te voorzien. Aangezien dit een onhanteerbaar array oplevert, zal voor een oplossing gekozen moeten worden met zo weinig mogelijk toevoerdraden naar het array.

Verder zal de elektronica die bij het array geplaatst moet worden vrij compact moeten blijven omdat er bij het array immers weinig plaats is. Tenslotte moet de voorzijde van het array uit veiligheidsoverwegingen aan massa blijven liggen (zie 6.1.3).

We moeten dus van (bijvoorbeeld) 128 elementen slechts acht naast elkaar gelegen elementen aansturen. De overige 120 moeten niet aangestuurd worden. Verder hebben we de beschikking over acht versterkers die zendpulsen afgeven.

We kunnen dit schematisch als volgt realiseren:

Omdat van de elementen $i, i+8, i+2*8, \dots, i+n*8$ (n geheel en > 1), $\{1 \leq i \leq 8\}$ steeds slechts één element wordt aangestuurd, kunnen we gebruik maken van een "draaischakelaar" (zie figuur 6.4), die van deze elementen er één op de versterker aansluit.



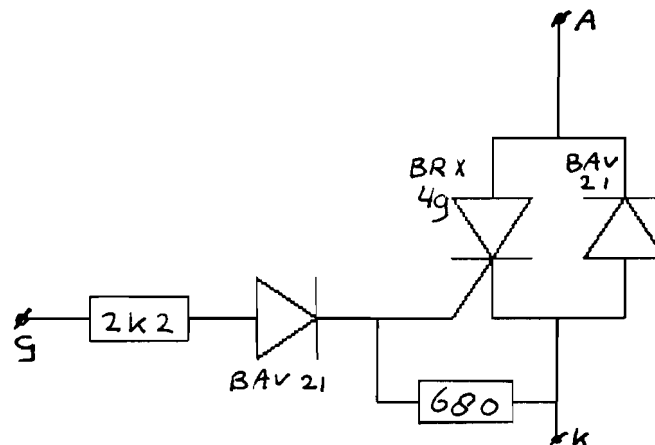
Figuur 6.4

Er zijn zo acht draaischakelaars nodig, met ieder $128 / 8 = 16$ contacten. Om correct te scannen, zullen de schakelaars steeds één voor één na elkaar een stapje verder moeten verdraaien. Als we de schakelaars van A t/m H noemen en de contacten van elke schakelaar nummeren van 1 t/m 16, dan ziet het begin van een scan er als volgt uit:

Tabel 6.1

scanstap	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
schake- laar	A	1	2	2	2	2	2	2	2	3
B	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
C	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
D	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
E	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
F	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
G	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
H	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2

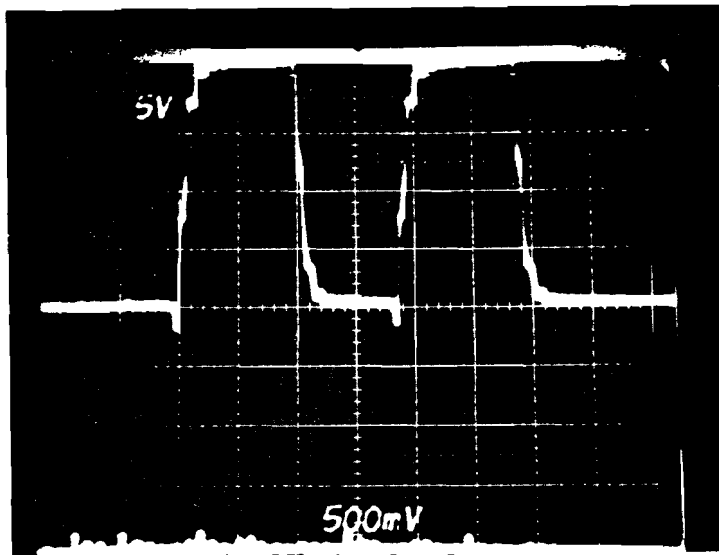
Als "fysische" schakelaar wordt gebruik gemaakt van een thyristor, met daaromheen een paar componenten, die er voor zorgen, dat de thyristor zich ook als een goede schakelaar gedraagt (in paragraaf 6.1.3. wordt besproken, waarom geen andere schakelaar is gebruikt). Eén enkele aan/uit schakelaar wordt als volgt opgebouwd (zie figuur 6.5):



Figuur 6.5

Hierbij dient de diode, die antiparallel over de thyristor is geplaatst, om het element (dat zich capacitief gedraagt) te ontladen; een thyristor geleidt de stroom slechts in één richting.

De weerstand tussen de gate en de kathode van de thyristor heeft de volgende functie: een normale thyristor zal, als hij eenmaal spert, blijven sperren als de gate-kathode spanning voldoende laag blijft. Als de spanning over de anode naar de kathode echter een grote potentiaalsprong vertoont (bv. $> 50 \text{ V}/\mu\text{s}$ bij een kleine thyristor, zoals hier wordt gebruikt), komt de thyristor spontaan in geleiding. Dit spontaan in geleiding komen, wordt veroorzaakt door een parasitaire capaciteit tussen de anode en de gate, die de potentiaalsprong gedeeltelijk doorgeeft van anode naar gate. Door nu een weerstand van gate naar kathode te leggen, wordt het effect van die parasitaire capaciteit aanmerkelijk verminderd. Zelfs potentiaalsprongen tot ca. $1 \text{ kV}/\mu\text{s}$ (welke bij de hier gebruikte zendpulsen voor kunnen komen, zie bijvoorbeeld fig. 6.6) worden dankzij deze weerstand goed verwerkt.

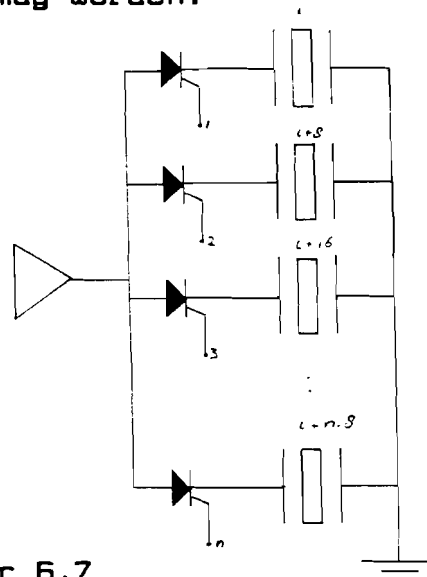


Figuur 6.6

De diode in de gateleiding dient om de logica, waarmee de thyristoren bestuurd worden, te beveiligen tegen te hoge spanningen, die via de gate-kathode weerstand op de gate kunnen komen bij een thyristor in geleiding.

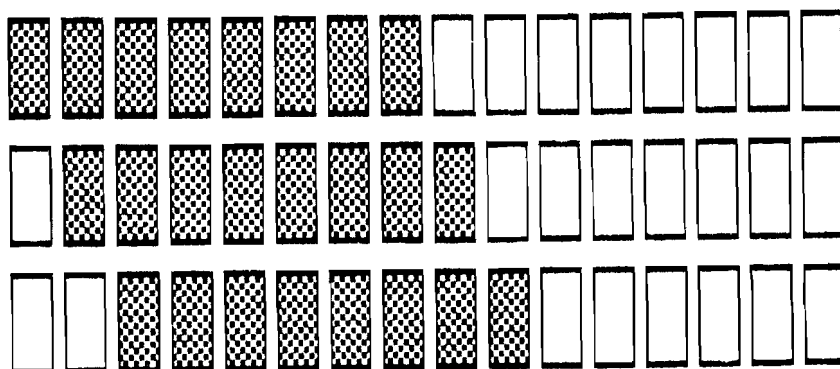
De weerstand in de gateleiding heeft als taak de gatestroom te beperken.

Uitgaande van één schakelaar wordt een "draaischakelaar" dan opgebouwd zoals in figuur 6.7 is te zien, waarbij de schakeling van figuur 6.5 is vervangen door een enkele (zwarte) thyristor. Verder geldt, dat van de thyristoren in de "draaischakelaar" steeds slechts één opengestuurd mag worden.



Figuur 6.7

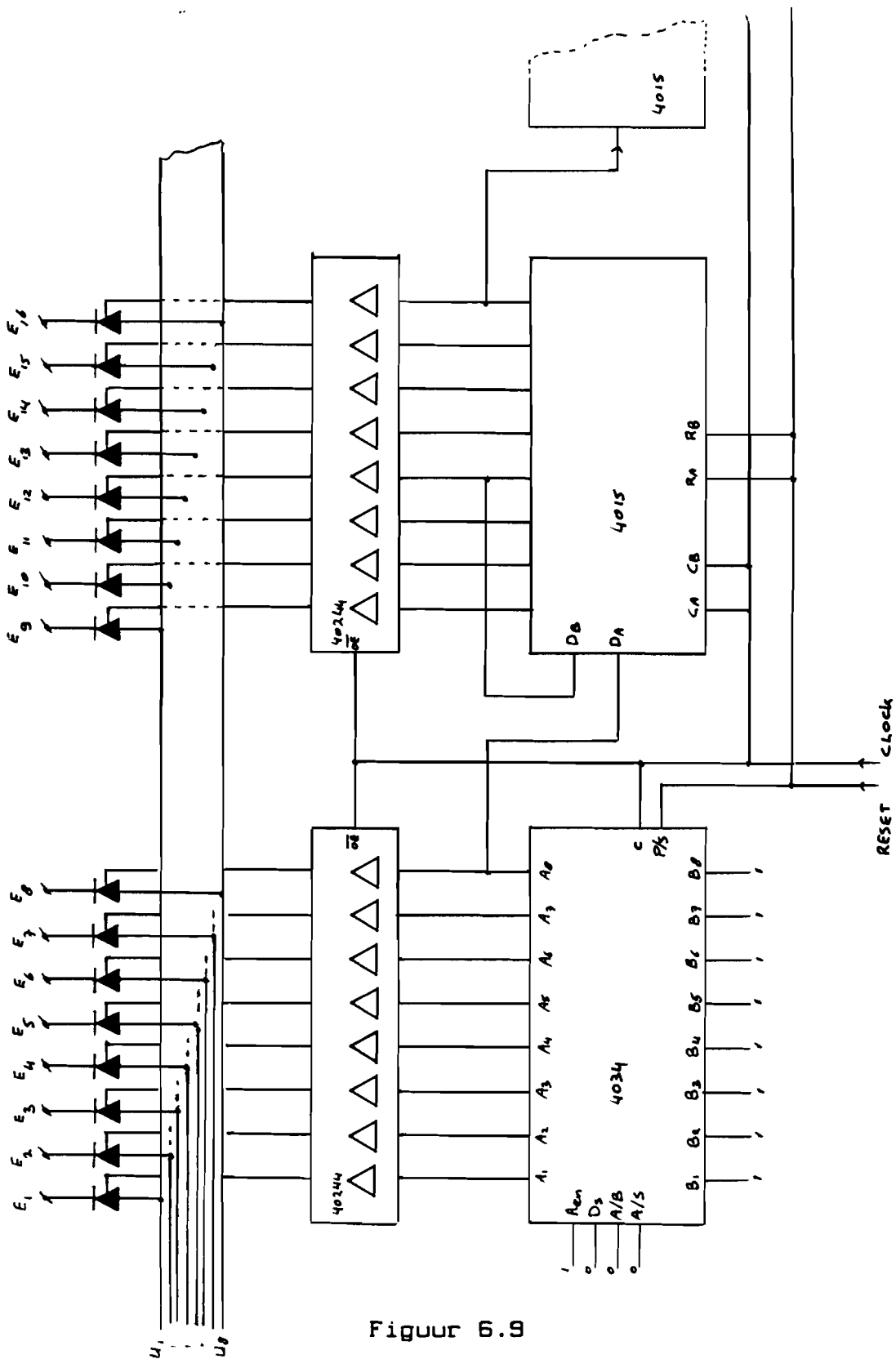
De logica waarmee de thyristor-schakelingen (ook wel element-schakelaars genoemd) worden aangestuurd, zal moeten voldoen aan de schakelstappen zoals in tabel 6.1. Nu is het vrij lastig om vanuit deze tabel direct tot de logica te komen. Dit gaat echter vrij eenvoudig als we bedenken hoe het scannen eruit zag (zie paragraaf 4.2, figuur 4.4; hieronder nog eens te zien als figuur 6.8).



Figuur 6.8

Hieruit blijkt dat het scannen erg veel op een schuifregister lijkt (neem voor de aangestuurde (gearceerde) elementen énen en voor de niet aangestuurde (witte) elementen nullen). Voor de aanstuurlogica ligt het dan dus voor de hand ook een schuifregister te nemen, waar tijdens het scannen acht énen door geschoven worden. In figuur 6.9 is het schema te zien van een schuifregister, waarmee we de elementschakelaars aan kunnen sturen (voor 16 elementen volledig getekend; een groep van acht elementen toevoegen is eenvoudig het herhalen van schuifregister 4015 en de omliggende elektronica). De acht versterkers worden aangesloten op U1 t/m U8, de elementen op E1 t/m E16.

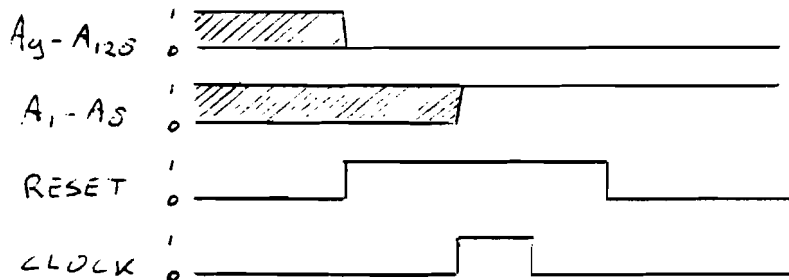
De "draaischakelaars" zijn hierin waarschijnlijk minder goed te herkennen. Toch zijn die hier aanwezig. Zo wordt de eerste draaischakelaar (schakelaar A in tabel 6.1) gerealiseerd door de thyristoren bij E1 en E9 (en E17 enz.). De tweede draaischakelaar zit bij E2 en E10 (en E18 enz.). Doordat steeds een groep van acht aaneengesloten énen door het schuifregister gestuurd worden, zullen bij elkaar horende elementschakelaars (die samen een "draaischakelaar" vormen) nooit tegelijkertijd in geleiding komen.



Figuur 6.9

Het schuifregister van figuur 6.9 heeft slechts twee stuursignalen nodig: een RESET, waarmee het groepje van acht énen aan het begin van het schuifregister geplaatst kan worden; en een CLOCK, waarmee de énen door het schuifregister verplaatst kunnen worden.

Om correct te resetten, moet tijdens het actief worden van de RESET-lijn, ook de CLOCK even actief worden (zie figuur 6.10).



Figuur 6.10

Zoals in figuur 6.9 is te zien, zijn de enable-ingangen van de buffers verbonden met de CLOCK-lijn. Dit is gedaan om er zeker van te zijn, dat na een CLOCK-puls alleen die thyristoren in geleiding zijn, die ook echt aangestuurd worden. Een thyristor heeft nl. de eigenschap, dat hij - eenmaal in geleiding - in geleiding blijft, zolang er een (voldoend grote) stroom door de thyristor loopt. Als nu de thyristorschakeling (van figuur 6.5) wordt aangestuurd, dan zal door de gate-kathode weerstand een gelijkstroom door het schakelnetwerk gaan lopen. Hierdoor bestaat de mogelijkheid, dat er thyristoren in geleiding blijven, ookal worden ze niet meer aangestuurd.

Ook een schakeling vóór de elementschakelaars zal, tijdens het maken van een scanstap, geen gelijkstroom in het schakelnetwerk mogen sturen (zie paragraaf 6.1.2).

Tenslotte is in de schakeling van figuur 6.9 nog de mogelijkheid aanwezig voor een foutencontrole door de computer. De mogelijkheid bestaat immers, dat door stoorpulsen extra clock-signalen zijn binnengekomen of bits zijn "omgevallen". Door nu de laatste uitgang van het schuifregister terug te voeren naar de computer, kan deze controleren of een scan correct is uitgevoerd: een te vroeg of te laat actief worden van deze uitgang (ook wel Terminal Count genoemd) duidt bijvoorbeeld op storingen van de CLOCK-lijn.

6.1.2. De multiplexers.

In paragraaf 6.1.1. hebben we verondersteld, dat we acht versterkers ter beschikking hebben, die op de één of andere manier de juiste zendpulsen geven voor focussering en apodisatie. Wat we in werkelijkheid echter hebben, is slechts de LAT, waarin vier versterkers zitten, die elk zendpulsen geven voor twee specifieke elementen uit een groep van acht. In deze paragraaf gaan we kijken, hoe we acht "onafhankelijke versterkers" kunnen simuleren.

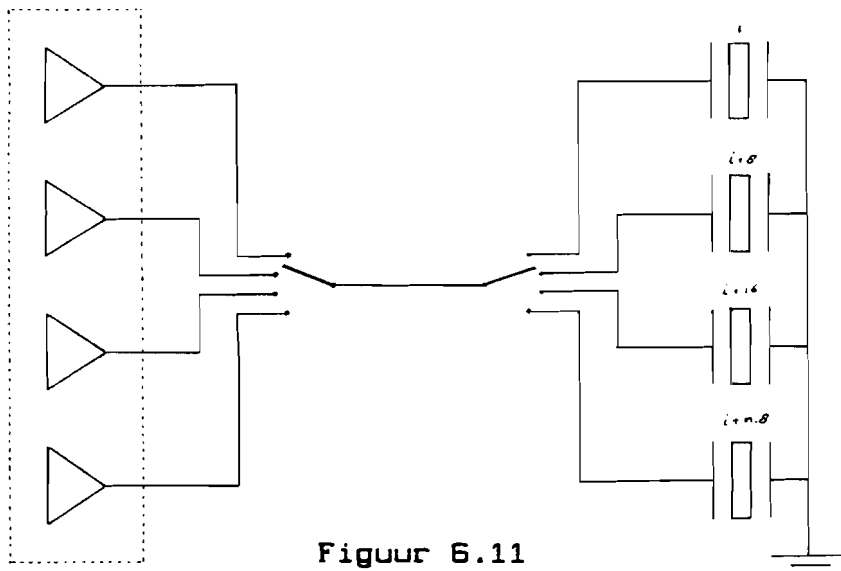
We kijken eerst wat één "groep" elementen, verbonden door de "draaischakelaar" van paragraaf 6.1.1 voor zendpulsen zou moeten krijgen tijdens de verschillende scanstappen. Als we dat weten, kunnen we daaruit generaliseren wat met de overige elementen moet gebeuren.

We nemen de elementen $1 + n \cdot 8$ (n geheel en ≥ 0). De pulsen die de elementen kunnen krijgen, nummeren we van A t/m D, waarbij A staat voor de puls voor de rand-elementen en D voor de middelste elementen. Deze groep elementen moet dan achtereenvolgens de volgende pulsen krijgen:

Tabel 6.2

scanstap	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
puls:	A	A	B	C	D	D	C	B	A	A	B

Ook dit is weer te realiseren met een draaischakelaar. In figuur 6.11 is te zien hoe elementen $1 + n \cdot 8$ (via de elementschakelaars) te koppelen zijn met de vier versterkers van de LAT.



Figuur 6.11

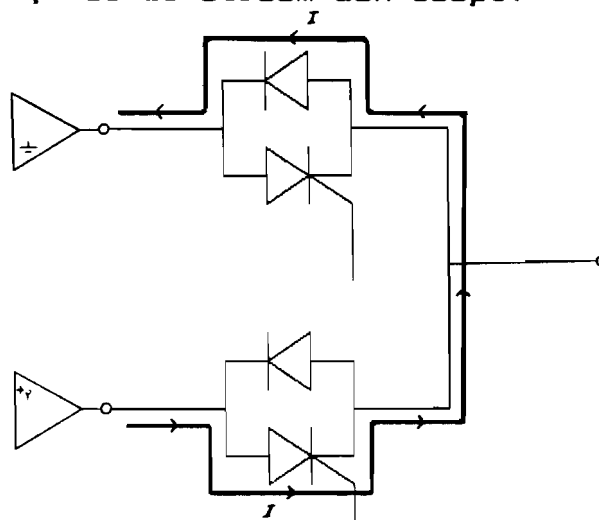
Tabel 6.3 geeft het overzicht voor alle elementgroepen, welke hier genummerd zijn van I t/m VIII (waarbij I = el. 1+n.B, II = 2+n.B, ...).

Tabel 6.3

scannr	1	2	3	4	5	6	7	8	9
el.gr.									
I	A	A	B	C	D	D	C	B	A
II	B	A	A	B	C	D	D	C	B
III	C	B	A	A	B	C	D	D	C
IV	D	C	B	A	A	B	C	D	D
V	D	D	C	B	A	A	B	C	D
VI	C	D	D	C	B	A	A	B	C
VII	B	C	D	D	C	B	A	A	B
VIII	A	B	C	D	D	C	B	A	A

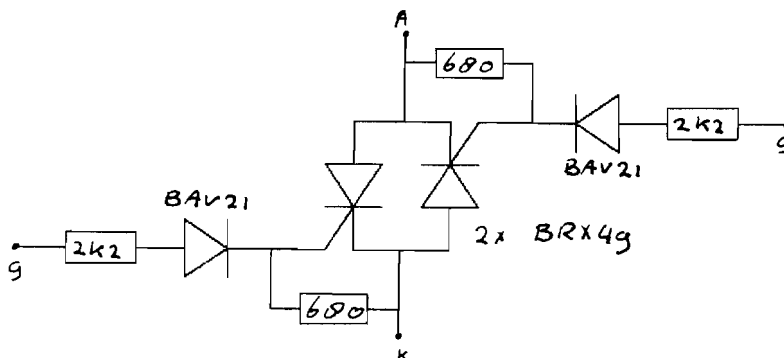
Voor elke elementgroep is zo een draaischakelaar te realiseren. Via tabel 6.3 en tabel 6.1 is dan af te leiden, aan welk "schakel-algorithme" de combinatie van schakelaars moeten voldoen.

De draaischakelaars die nodig zijn voor de multiplexers, kunnen weer fysisch gerealiseerd worden met thyristoren. We moeten nu echter een andere thyristorschakeling gebruiken dan in figuur 6.5 is getekend. Zou deze namelijk gebruikt worden, dan ontstaan er kortsluitingen tussen de versterkers in de LAT. In figuur 6.12 is te zien hoe zo'n kortsluiting ontstaat (de thyristorschakeling is om het overzicht te bewaren slechts gedeeltelijk getekend): de onderste versterker heeft op dat moment een hoog uitgangsniveau, de bovenste versterker heeft een laag uitgangsniveau; verder geleidt de onderste thyristor, terwijl de bovenste spert. In de figuur is te zien, hoe de stroom dan loopt.



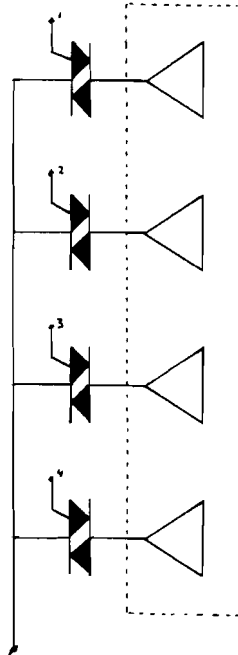
Figuur 6.12

Door in de schakeling van figuur 6.5 de diode die parallel aan de thyristor staat te vervangen door een thyristor (met bijbehorende componenten), krijgen we een triacschakeling, die de versterkers niet kortsluit. In figuur 6.13 is de schakeling te zien. De gate's (G1 en G2) worden met elkaar doorverbonden.



Figuur 6.13

In figuur 6.14 is te zien hoe de multiplexer-draaischakelaar met behulp van triacschakelingen is gerealiseerd. De triacschakeling is hier voor de duidelijkheid vervangen door een enkele (zwarte) triac.

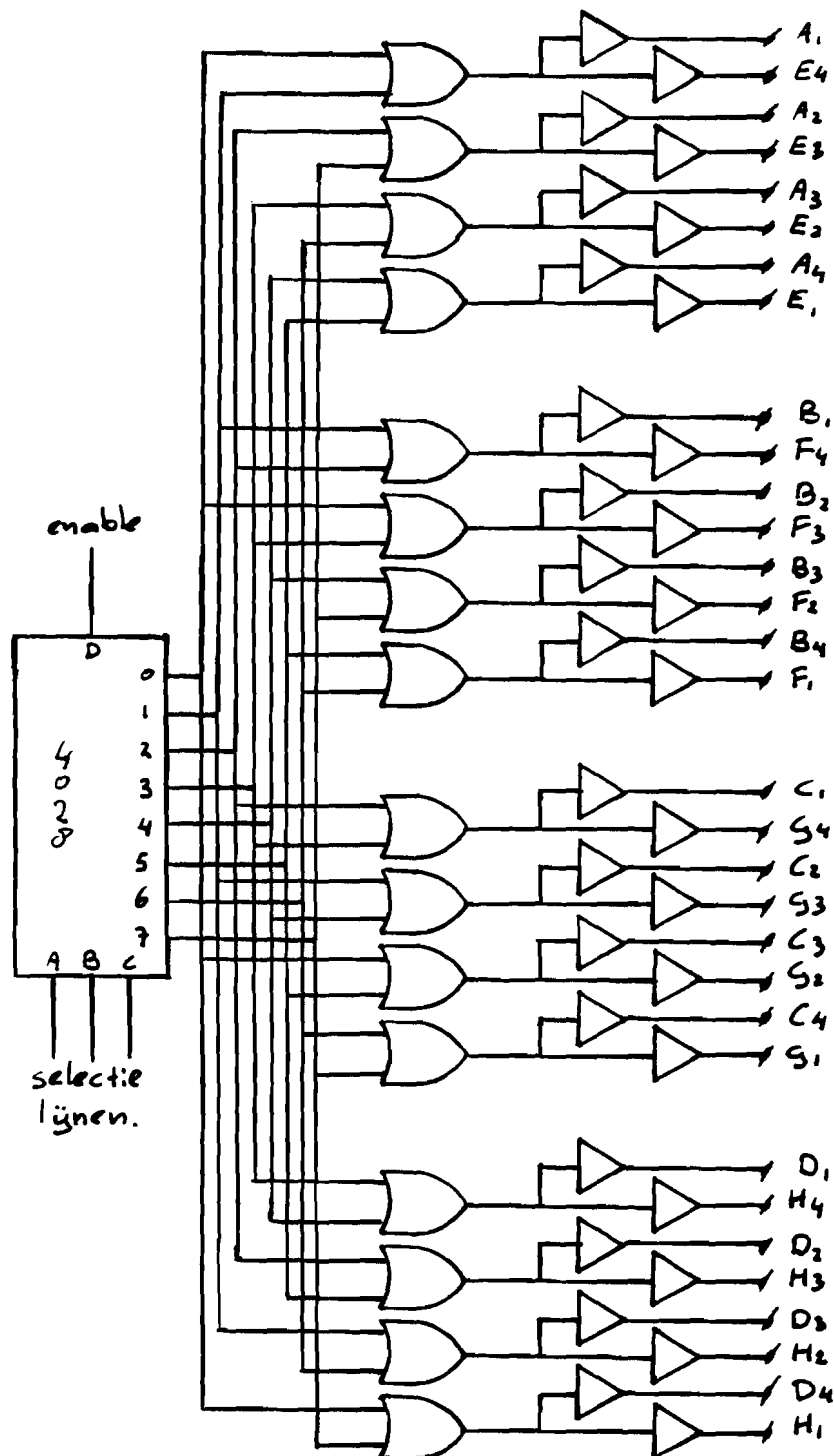


Figuur 6.14

De logica waarmee deze multiplexer wordt aangestuurd, zal moeten voldoen aan tabel 6.3. Hierbij valt op te merken, dat bij scanstap $i+n \cdot 8$ de schakelaars in dezelfde stand staan als in stap i (n geheel en $n > 0$). Hierdoor kan als invoer voor de besturingslogica voor de multiplexer de waarde van (scanstap modulo 8) gebruikt worden: een combinatie van drie bit die door de computer aan de logica wordt aangeboden.

In figuur 6.15 is het schema te zien van de logica. Hier is uitgegaan van een echte decodeerschakeling, die de drie-bits invoer omzet naar besturingssignalen voor de triacschakelingen.

De "nummering" achter de buffers is als volgt samengesteld: er zijn acht "draaischakelaars", genummerd A t/m H. Elke draaischakelaar bestaat uit vier triacschakelingen, genummerd 1 t/m 4 (zie figuur 6.14). Als na een buffer E3 staat, dan betekent dit, dat de uitgang van het betreffende buffer wordt verbonden met de gate van triac nr. 3 in "draaischakelaar" E.



Figuur 6.15

Ook bij de schakeling van figuur 6.15 is een enable-ingang te zien. Op deze ingang moet het CLOCK-signaal gezet worden, dat ook al in figuur 6.9 te zien was. Zoals al in de vorige paragraaf is uitgelegd, dient dit uitschakelen van alle thyristoren tijdens het maken van een scanstap, om er zeker van te zijn, dat geen enkele thyristor ongeoorloofd in geleiding blijft.

6.1.3. Andere mogelijke schakelingen.

In deze paragraaf worden een aantal alternatieven besproken om het scannen te realiseren, die wel zijn bekeken, maar niet zijn toegepast. Uitgelegd zal worden waarom deze alternatieven niet gebruikt zijn of niet te gebruiken zijn.

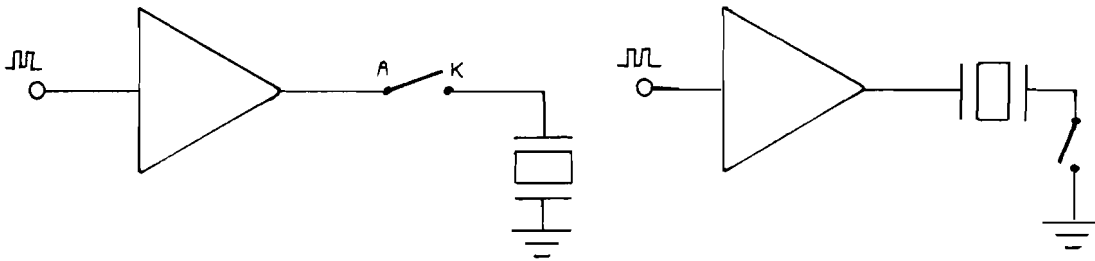
* Het aanpassen van de LAT.

Om 128 elementen aan te sturen, is het mogelijk om per element een aparte versterker te gebruiken, die dan (via één of ander schakelnetwerk) de juiste signalen aan het betreffende element geeft. Hieraan zijn een aantal grote nadelen verbonden:

- om te beginnen nemen 128 versterkers veel plaats in.
- 128 versterkers bouwen kost veel geld.
- de versterkers kunnen niet bij het array geplaatst worden. Dit betekent dat er 128 afgeschermdes kabels van de versterkers naar het array moeten lopen, waardoor het array niet meer te hanteren zal zijn.
- het is zeer lastig om van een versterker snel de versterkingsfactor in te stellen. Snelle sprongen in de voedingsspanning V_{HS} resulteren in grote gate-source spanningen over de FET IRFD 9210, waar deze absoluut niet tegen kan.

* De elementschakelaar is geplaatst tussen de versterker en het element. In principe kan de schakelaar ook tussen het element en de massa geplaatst kunnen worden (zie figuur 6.16). Dit zou echter betekenen, dat de voorzijdes van de elementen niet meer automatisch met massa verbonden zijn: op de voorzijdes van de elementen kunnen dan ook de hoogspanningspulsen komen te staan. Aangezien de voorzijdes van de elementen contact maken met het water waar de te onderzoeken persoon in zit, is dit wegens veiligheidsredenen totaal onverantwoord.

Mocht echter deze reden niet aanwezig zijn, dan nog zou het hier niet mogelijk geweest zijn de schakelaars in de massaleidingen op te nemen, omdat dan een volledig nieuw array nodig zou zijn.



Figuur 6.16

* Als elementschakelaars zijn ook componenten zoals transistoren, FET's, CMOS-schakelaars, triac's en relais' bekeken.

- een transistor is niet toe te passen, omdat deze slechts geleidt, als de basis-emitter spanning ongeveer 1 volt is. Als de transistor hoogspanningspulsen van bijvoorbeeld 100 V moet schakelen, dan kan zowel de collector als de emitter op een potentiaal van 100 V komen te staan. Als de emitterpotentiaal 100 Volt is, dan zal de basispotentiaal ca. 101 V moeten zijn, als de transistor in geleiding moet blijven. Dit is echter zeer lastig te realiseren (zeker als de schakeling compact moet blijven).

- Voor een "normale" FET, waar het substraat aan de source vastligt, gaat hetzelfde verhaal op als bij de transistor. Een FET met losliggend substraat zou in principe wel te gebruiken zijn. Hier doet zich echter het probleem voor, dat verkrijgbare FET's met losliggend substraat slechts spanningen tot ca. 50 V kunnen verwerken; hier hebben we echter met spanningen tot zo'n 100 V te maken.

- CMOS-schakelaars zijn in feite FET's met losliggend substraat. Ook deze kunnen geen grote spanningen verwerken. De gebruikelijke CMOS-schakelaar kan maximaal slechts ca. 30 V verdragen; speciale types gaan soms tot ca. 50 V, wat echter nog steeds te weinig is.

- Ook een triac is niet geschikt bevonden. In principe zou een triac goed te gebruiken zijn; echter verkrijgbare types blijken een veel te grote gatestroom nodig te hebben om opengestuurd te

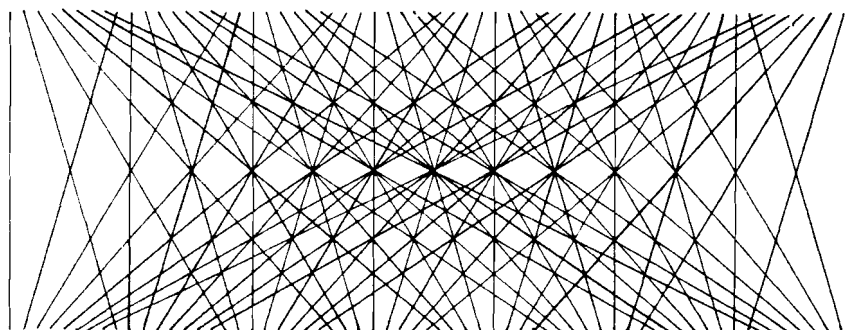
kunnen worden. Dit zou betekenen, dat de aanstuurlogica grote stromen moet kunnen leveren en dat in het schakelnetwerk van triac's flinke gelijkstromen gaan lopen.

- Relais' zouden zeer goede schakelaars zijn. Het probleem dat zich bij een relais echter voordoet, is dat hij vrij traag is. Snelle relais' hebben nog altijd een aan- en uitschakeltijd van ca. 0,5 milliseconde. Dit zou de scansnelheid merkbaar gaan beïnvloeden. Verder nemen (reed)relais nog vrij veel plaats in; wat het gebruik niet echt aantrekkelijk maakt. Tenslotte is de levensduur van een relais vaak beperkter dan van elektronische componenten.

* De logica om de elementschakelaars te besturen.

Hiervoor is gedacht aan een soort decoder, die een (7-bits) controle-woord van de computer omzet naar de stuursignalen voor de thyristor-schakelingen. Dit is bijvoorbeeld mogelijk met PROM's, die samengevoegd een "grote" PROM kunnen vormen met 7 ingangssignalen en 128 uitgangssignalen. Het nadeel hiervan is dat defect geraakte IC's niet zonder meer vervangen kunnen worden: een nieuwe PROM moet eerst geprogrammeerd worden. Verder is op de vakgroep totaal geen mogelijkheid om kleine PROM's te programmeren.

Ook met "normale" logica, zoals CMOS decoders is het niet mogelijk een grote decoder te maken. Niet zozeer omdat het op papier niet lukt, maar omdat er in de praktijk een enorm dradenweb ontstaat (doordat 1 uit 8 of 1 uit 16 decoders gebruikt moeten worden). Hoewel zo'n dradenweb esthetisch misschien wel verantwoord is, is het in de praktijk nauwelijks te realiseren (zie figuur 6.17).



Figuur 6.17

* De multiplexer.

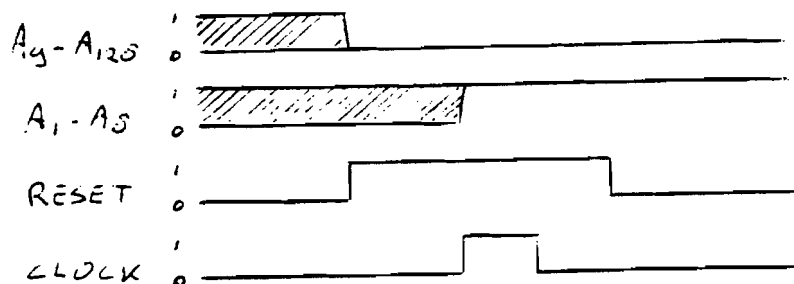
In plaats van de in paragraaf 6.1.2 besproken triac-schakelingen, is bekeken of de LAI hier aangepast zou kunnen worden. Inderdaad is het mogelijk de focussering in de LAI te multiplexen. De apodisatie maakt het veranderen van de LAI echter zeer lastig; zoals aan het begin van deze paragraaf al is vermeld.

6.2 Stuursignalen.

In paragraaf 6.1.1 en 6.1.2 hebben we de logica gezien, die nodig is om de elementschakelaars en de multiplexer aan te sturen. In deze paragraaf worden de signalen opgesomd, waarmee deze logica bestuurd moet worden.

1) Het aansturen van het schuifregister .

* Resetten (input): door de lijn RESET actief te maken, zullen de schuifregisters 4015 gereset worden. Schuifregister 4034 zal door het actief maken van dit signaal niet gereset worden. Dit gebeurt pas, als de clock actief wordt, tijdens het reset-sigitaal (zie figuur 6.18); dan zullen alle uitgangen van dit schuifregister actief worden.



Figuur 6.18

- * Schuiven(input): de acht actieve bits in het schuifregister worden verschoven door de lijn CLOCK actief te maken. Op de opgaande flank zal de data verschoven worden. Tijdens de actieve periode van de clock zullen de buffers gedisableed worden, waardoor de thyristoren uitgeschakeld zullen zijn.
- * Einde scan (output): de laatste uitgang van het schuifregister wordt gebruikt om aan te geven, of een scan beëindigd is. Als de lijn IC actief wordt, dan wordt het laatste element aangestuurd, en is de scan beëindigd.

2) Het aansturen van het schakelnetwerk voor de multiplexer.

De 1-uit-8 decoder heeft vier logische ingangen. Drie daarvan dienen om één van de acht uitgangen actief te maken (en daardoor via de poorten een bepaalde versterker op een bepaalde uitgang te selecteren); de vierde ingang (enable) maakt het mogelijk alle triac-schakelingen uit te zetten. Deze ingang wordt verbonden met het signaal CLOCK (zie fig. 6.9).

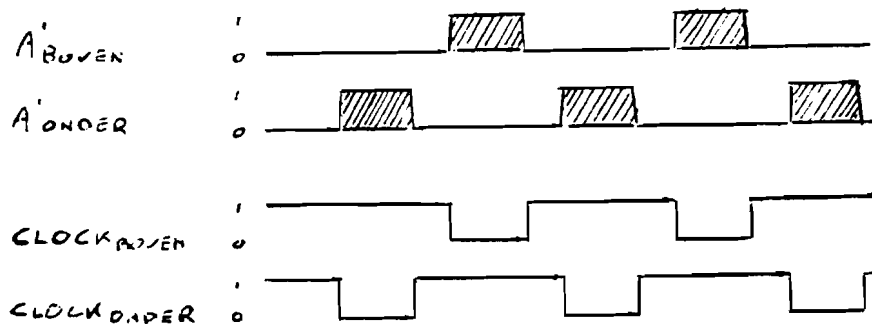
De drie ingangen A, B en C moeten door de computer of door een externe teller aangestuurd worden. Bij elke clockpuls die aan het schuifregister wordt gegeven, moet de teller één opgehoogd worden, of de computer een code versturen, die één waarde hoger is dan de vorige code (modulo acht: zie 6.1.2). Als het schuifregister gereset wordt, dan moet op de ingangen van de multiplexer (A,B,C) de binaire waarde 0 komen te staan.

5.3 Aanpassen van de elektronica voor verschillende aanstuurmogelijkheden.

Tot nu toe hebben we alleen bekeken, hoe de elektronica eruit ziet, als we acht naast elkaar gelegen elementen aan willen sturen. Zoals al in de vorige paragrafen ter sprake is gekomen, zal de elektronica aangepast moeten worden, als er een andere aansturing wordt toegepast. In deze paragraaf zullen we bekijken, hoe de elektronica voor verschillende aansturingen zou moeten veranderen, waarbij alleen de om- en om aansturing volledig zal worden bekeken.

- 1) Het gebruik van bredere elementen. Het zal duidelijk zijn, dat bij het gebruik van bredere elementen, aan de elektronica niets veranderd hoeft te worden.
- 2) De 16-elements aansturing. Hierbij hebben we acht signalen van de L.A.T. (die dus al twee keer zo groot moet worden) en zestien signalen, die naar het array gaan. Dit betekent, dat de multiplexer (vergeleken met de vorige paragraaf) twee keer zoveel ingangssignalen en twee keer zoveel uitgangssignalen moet verwerken, en dus vier keer zo groot wordt. Aan het schuifregister hoeft niet veel veranderd te worden; in plaats van acht ãnen moeten nu 16 ãnen verplaatst worden.
- 3) Het parallel schakelen van twee elementen, met 8ãn-elements stapgrootte. We moeten nu zowel de multiplexer, als het schuifregister uitbreiden. De multiplexer, omdat nu zestien uitgangssignalen verdeeld moeten worden; het schuifregister, omdat zestien elementen aangestuurd moeten worden (zoals bij de 16-elements aansturing).
- 4) Het om en om aansturen van de elementen. Hierbij kunnen we de L.A.T en de multiplexer ongemoeid laten. Alleen rond het schuifregister moet het een en ander gewijzigd worden. Om deze veranderingen te beschrijven, maken we gebruik van het feit, dat de even elementen van het array met de ãne kant van de

print zijn verbonden en de oneven elementen met de andere kant. (Voor het gemak spreken we van boven- en onderkant van het array als we boven- en onderkant van de print bedoelen.) We kunnen deze aansturing dus beschouwen als het afwisselend aansturen van de bovenkant en van de onderkant van het array. Dit is zeer eenvoudig te realiseren, door het schuifregister twee keer uit te voeren, waarbij het éne schuifregister aan de bovenkant van het array wordt geplaatst, en het andere aan de onderkant. Dit betekent ook, dat de clock en eventueel Terminal Count lijnen twee maal uitgevoerd moeten worden. De reset-lijnen mogen met elkaar doorverbonden worden. Door nu afwisselend de bovenste en de onderste helft van het array aan te sturen, kunnen we de elementen om en om aansturen. Om deze elektronica zo aan te sturen, dat het array afwisselend boven en onder wordt ingeschakeld, kunnen we de volgende stuursignalen gebruiken (zie figuur 6.19):



Figuur 6.19

6.4 De ontvangstelektronica.

Niet alleen om het ultrageluid uit te zenden, maar ook om het te ontvangen, wordt een array gebruikt. Ook het ontvangst-array zou, in principe, gefocusseerd kunnen worden (er zouden een aantal elementen gebruikt kunnen worden, waarvan de signalen, na vertraging, bij elkaar opgeteld kunnen worden). Om dit focuseren mogelijk te maken (zonder het signaal al te veel te vervormen), is echter zeer dure en complexe elektronica nodig, zoals (digitale) vertraginglijnen met hoge sample-frequenties (bijv. 100 MHz), of zeer snelle A/D omzetter met de bijbehorende snelle logica. Focuseren gaat nl. alleen maar goed, als de signalen vertraagd worden, zonder dat ze vervormd worden. Dit betekent o.a., dat de vertraginglijn een lineaire fasekarakteristiek moet hebben; iets wat in de praktijk zeer lastig te realiseren is.

Wat wel goed mogelijk is, is het scannen van één element van het array, waardoor je een smalle ontvanger krijgt, die op een willekeurige plaats het signaal ontvangt. De elektronica, die hiervoor nodig is, is op dit ogenblik alleen op papier ontworpen, maar zal, door zijn eenvoud, in de praktijk waarschijnlijk geen moeilijkheden opleveren.

Het principe is als volgt: de computer geeft aan de logica (een aantal standaard CMOS-multiplexers) aan, welk element als ontvangstelement geschakeld moet worden. Het signaal van dit element wordt vervolgens versterkt en kan dan naar de meetkast [lit. 16]. In figuur 6.20 is het schema te zien van de logica, waarmee één element uit 64 geselecteerd kan worden. Door deze schakeling twee maal uit te voeren (bijvoorbeeld voor de boven- en onderkant van het array) kan 1 element uit 128 geselecteerd worden.

Als versterker kan een standaard versterker gebruikt worden, die ook in de single-element opstelling toegepast wordt.

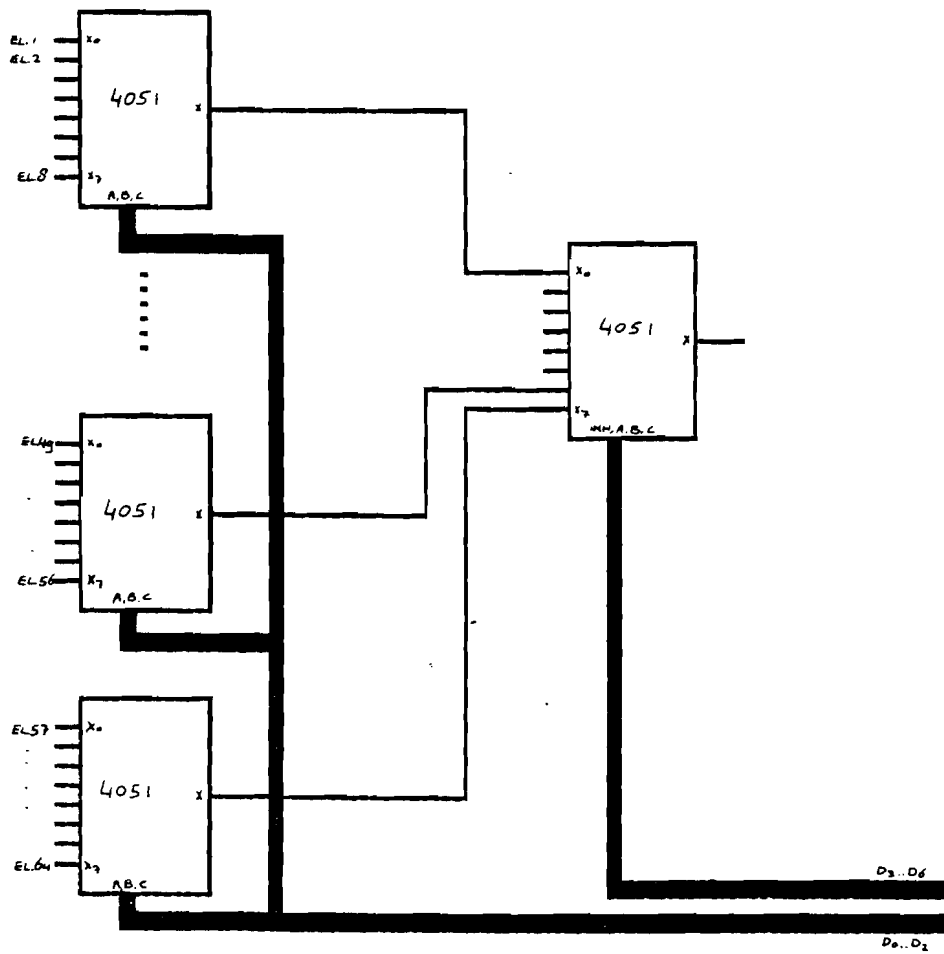


Figure 6.20

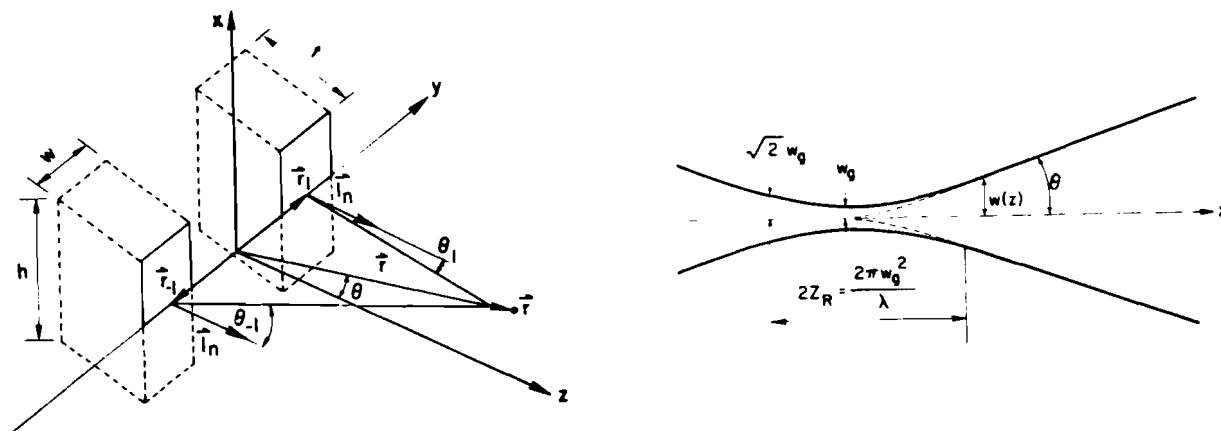
7. Simulatieprogramma's.

In dit hoofdstuk komen de programma's ter sprake, waarmee de velden, die in hoofdstuk 5 te zien zijn, zijn berekend. Voordat op de programma's wordt ingegaan, zal echter eerst de theorie besproken worden, die de achtergrond van deze programma's vormt. Eerst zal worden ingegaan op de theorie zoals Duerinckx [7] deze beschrijft; vervolgens wordt ingegaan op de theorie van verschillende schrijvers, die door Peter Wardenier [17] is gebundeld; daarna komt de theorie ter sprake, waarmee de focuserings- en apodisatieparameters bepaald kunnen worden.

7.1 Theorie om de velden te berekenen.

7.1.1 De theorie volgens Duerinckx.

In deze paragraaf zullen een aantal symbolen gebruikt worden. De betekenis van de meeste symbolen is te zien in figuur 7.1.



Figuur 7.1

We kunnen de druk in een bepaald punt r als volgt uitdrukken:

$$P(r,t) =$$

$$\sum_{i=-N/2}^{i=+N/2} \left\{ S_i(r-r_i) \cdot p_{tr,i} \cdot \left[t - \frac{|r-r_i|}{v_0} - \delta t_i(r) \right] \cdot e^{-\alpha_0 |r-r_i|} \right\} \quad (7.1)$$

met t de tijd, de functie $S_i(r-r_i)$ het stralingspatroon veroorzaakt door een individueel array element [6], $\alpha(f) = \alpha_0$ de frequentieonafhankelijke verzwakking, v_0 de frequentieonafhankelijke geluidssnelheid, δt_i de tijdvertraging (afhankelijk van de focusering) en $p_{tr,i}(t) = p_{tr}(t)$ de akoestische druk, gegenereerd door één element.

Duerinckx geeft voor $S_i(r-r_i)$:

$$S_i(r-r_i) = A_i G_i(|r-r_i|) \tau_i(\theta_i) \quad i=-N/2 \dots +N/2 \quad (7.2)$$

met A_i de apodisatie-parameter, G_i de geometrische spreidfactor, $\tau_i(\theta_i)$ het stralingsprofiel voor individuele elementen, gemeten bij de centrale frequentie.

Als $w \approx 1$, dan kunnen we $\tau_i(\theta_i)$ benaderen door:

$$\tau_i(\theta_i) = \text{sinc}\left(\frac{w_{eq}}{1} \sin \theta_i\right) \quad (7.3)$$

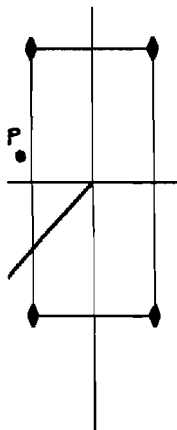
met w_{eq} de equivalente breedte van een element, 1 de golflengte en $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/\pi x$

Vergelijking 7.1 geldt in principe alleen voor een smalbandig systeem, dat wil zeggen voor continu of semicontinu geluid. Gepulst geluid daarentegen is breedbandig. Voor het breedbandige systeem is de verzwakking $\alpha(f)$ wel frequentieafhankelijk, evenals $S_i(r-r_i)$.

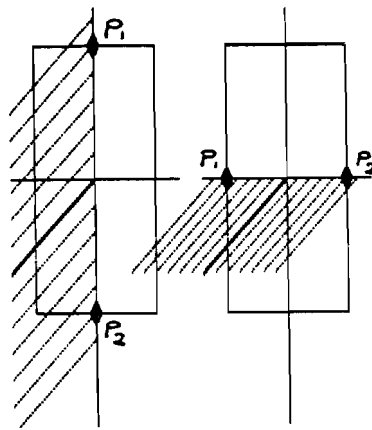
Verder is het drukgolffront $p_{tr,i}(t)$ een functie van θ_i voor grote hoeken. Voor "normaal" focuseren (zoals in figuur 4.2) en frequentieonafhankelijke verzwakking blijft dit alles ook geldig voor gepulst geluid.

7.1.2. De theorie volgens Peter Wardenier.

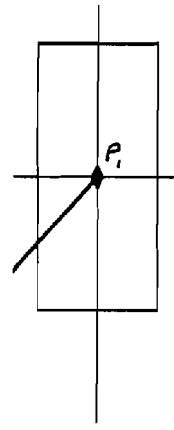
Peter Wardenier [17] heeft een ander berekeningswijze gebruikt. Bij het stralingspatroon dat hij krijgt, wordt er vanuit gegaan, dat het veld van een enkel element, in het algemene geval, te beschrijven is met vier puntbronnen (fig. 7.2). Kijken we in een punt P naar de druk, zodanig dat P op één van de middenloodvlakken van het element ligt, dan kan de druk in dat punt P door twee puntbronnen beschreven worden (fig 7.3). Ligt P op de snijlijn van de twee middelloodvlakken, dan kan de druk beschreven worden met slechts één puntbron (fig. 7.4).



Figuur 7.2



Figuur 7.3



Figuur 7.4

In ons geval kijken we alleen in het horizontale middelloodvlak ($x_p \neq 0, y_p = 0$) naar de druk en we hebben dus slechts met de laatste twee mogelijkheden te maken. We kunnen de druk in een punt P dan als volgt beschrijven:

$$p_1 = p_0 \cdot \frac{1 \cos\theta}{2\pi r_m \sin\theta} e^{-jkr_1} \quad (7.4)$$

$$p_2 = p_0 \cdot \frac{-1 \cos\theta}{2\pi r_m \sin\theta} e^{-jkr_2} \quad (7.5)$$

als P niet op de Z-as ligt, en als:

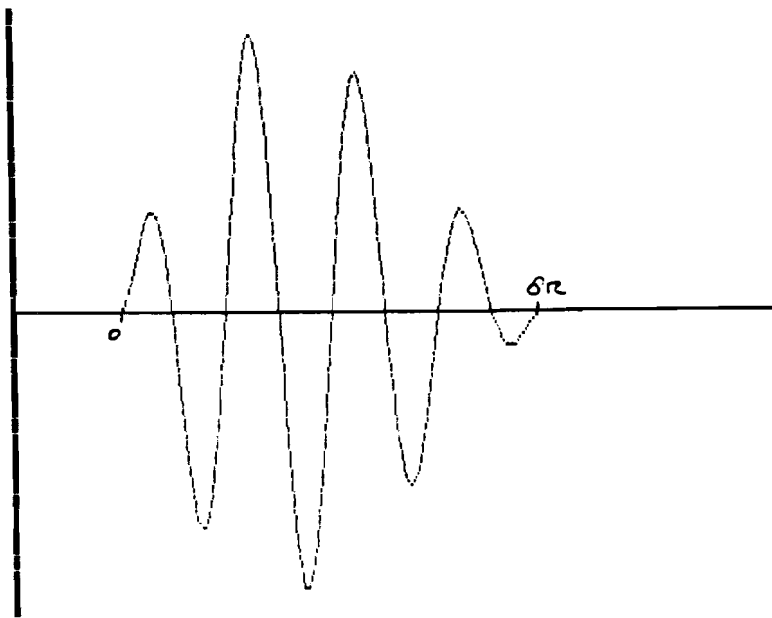
$$p_1 = p_0 \cdot \frac{jkw_1}{2\pi r_m} e^{-jkr_1} \quad (7.6)$$

als P op de Z-as ligt. Voor p_0 wordt de volgende functie

gebruikt: $p_0 = \sin(h) \cdot \sin(h/8) \cdot \exp(-h/20)$ ($0 < h < 8 \cdot \pi$)

$p_0 = 0$ ($h < 0$ of $h > 8 \cdot \pi$)

In figuur 7.5 is te zien hoe deze functie eruit ziet.



Figuur 7.5

7.1.3 Focuserings- en apodisatieparameters.

Door in vergelijking 7.1 de δt_i 's te variëren kunnen we de bundel focuseren. Verderop zal ter sprake komen, hoe de δt_i 's bepaald kunnen worden. We bekijken nu eerst de 'focuseringssterkte' of 'focuseringsgraad'. Hiermee bedoelen we de mate waarin de geluidsbundel gefocuserd is. Duerinckx geeft voor de focuseringsgraad de volgende formule:

$$K = \frac{D^2}{2 F 1} \quad (7.7)$$

met D de apertuur, F de brandpuntsafstand en l de golflengte. We kunnen K ook als volgt definiëren:

$$K = \frac{\theta_{\text{geometrie}}}{\theta_{\text{verre-veld}}} \quad (7.8)$$

waarbij

$\theta_{\text{geometrie}} = D/F$: de hoek die het actieve deel van het array opspant, gezien vanuit het brandpunt en

$\theta_{\text{verre-veld}} = \lambda/D$: de hoek van het door diffractie begrensde gebied.

Met K gedefinieerd als in vergelijking 7.8 wordt over het algemeen aangenomen, dat een bundel sterk gefocusseerd genoemd mag worden, als $K > 4$, en zwak gefocusseerd als $K < 4$.

Als we nu naar ons array kijken, met acht naast elkaar gelegen aangestuurde elementen en een brandpuntsafstand van 75 mm, dan krijgen we $K \approx 0,67$, wat duidt op een zeer zwakke focussering.

Matched Gaussian Amplitude Apodization (M.G.A.)

MGA wordt toegepast om het bundelprofiel (dat is: de grootte en vorm van de zijlobben) te controleren. Duerinckx [7] en Peter Wardenier [17] hebben de berekening van de apodisatieparameters uitgewerkt en Peter wardenier heeft het effect van MGA vrij uitgebreid bekeken. Hier zullen daarom alleen de eindresultaten ter sprake komen.

We definiëren het Rayleigh gebied (de -3dB focusdiepte voor een gaussische straal) als volgt:

$$Z_R = \frac{\pi w_g^2}{1} \quad (7.9)$$

Verder geldt:

$$w(z') = w_g \sqrt{1 + (z'/z_r)^2} \quad (7.10)$$

$$R(z') = z' [1 + (z_r/z)^2] \quad (7.11)$$

$$\varphi(z') = \arctan(z'/z_r) \quad (7.12)$$

met z' de afstand tot het array, waarbij $z' = 0$ correspondeert met de 'taille' van de bundel (in het brandpunt)

De tijdvertragingen, nodig om het array te focuseren, zijn te bepalen uit:

$$\delta t_i(y_i) = \frac{y_i^2}{2cR_a} \cos^2 \theta \quad (7.13)$$

met y_i de positie van het betreffende element langs de y -as, c de geluidssnelheid, R_a de krommingsstraal van het fasefront, en θ de stuurhoek van de bundel (die in ons geval 0° is, omdat wij niet sturen). Voor $\theta = 0^\circ$ krijgen we de volgende fasevertragingen:

$$\delta \varphi(y_i) = -j\omega \delta t_i(y_i) = -jk \frac{y_i^2}{2R_a} \quad (7.14)$$

De apodisatieparameters worden uit de volgende formule bepaald:

$$A_i(x,y) = A(x) \exp\left(-\frac{y^2}{w_a^2}\right) \quad (7.15)$$

$$\text{met } w_a = w(z'=-F) = w_g \sqrt{1 + (F/z_a)^2} \quad (7.16)$$

$$\text{en } R_a = |R(z'=-F)| = F \left(1 + (z_r/F)^2\right) \quad (7.17)$$

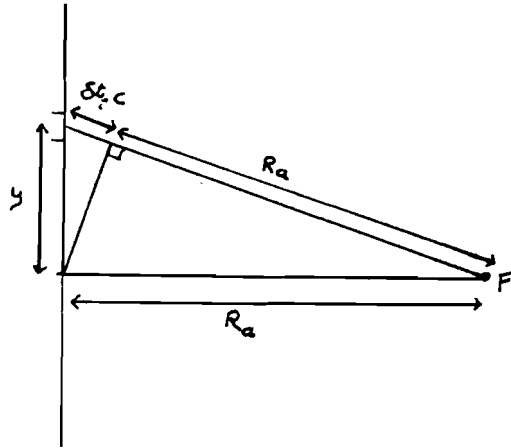
$$\text{Voor } w_g \text{ tenslotte geldt: } w_g = 0,733 \frac{F}{D} \quad (7.18)$$

1

D

Tenslotte nog iets over de tijdsvertragingen δt_i : als gewerkt

wordt met golflengtes die vele malen kleiner zijn dan de afmetingen van de transducers, dan kan δt_i als volgt worden bepaald (zie figuur 7.6):



Figuur 7.6

$$R_a^2 + y^2 = (R_a + \delta t_i \cdot c)^2 \quad \{y = d \cdot (i-1/2)\}$$

$$R_a^2 + y^2 \approx R_a^2 + 2R_a \delta t_i \cdot c$$

$$R_a \approx \frac{y^2}{2\delta t_i \cdot c}$$

$$\delta t_i \approx \frac{y^2}{2R_a c} \quad \{y = d \cdot (i-1/2)\}$$

waarbij R_a hier de brandpuntsafstand is, terwijl in vergelijking 7.14 R_a de krommingsstraal van het fasefront is. Bij relatief kleine golflengtes zijn deze twee aan elkaar gelijk, bij grotere golflengtes treedt een duidelijk merkbare afwijking op.

7.2 Verklaring simulatieprogramma's

Met het programma GAUSS kan de maximale druk over een lijn op een bepaalde afstand Z van het array, waarvan een N -aantal elementen ($N = \text{even}$) worden aangestuurd, bepaald worden. Dit programma draaide reeds, in een beknoptere vorm, in ALGOL op de Burroughs. Het programma is nu overgezet naar PASCAL en draait op een IBM-PC, waarbij het programma zodanig is uitgebreid, dat in principe ook plaatjes van een volledig veld gemaakt kunnen worden.

Vervolgens is het programma GAUSS omgeschreven tot het programma KOPPEL, waarmee het veld is te bepalen van een array met om-en-om aangestuurde elementen en met - door koppeling - meetrillende tussenliggende elementen.

In deze paragraaf zal het programma GAUSS besproken worden; in de volgende paragraaf wordt ingegaan op het programma KOPPEL.

Het programma GAUSS bepaald de maximale druk in een bepaald punt door, zolang er in dat punt 'geluid' is, de som te bepalen van de momentane waarden van alle drukken in dat punt, veroorzaakt door de aangestuurde elementen en van deze momentane gesommeerde druk het maximum van de absolute waarde te bepalen.

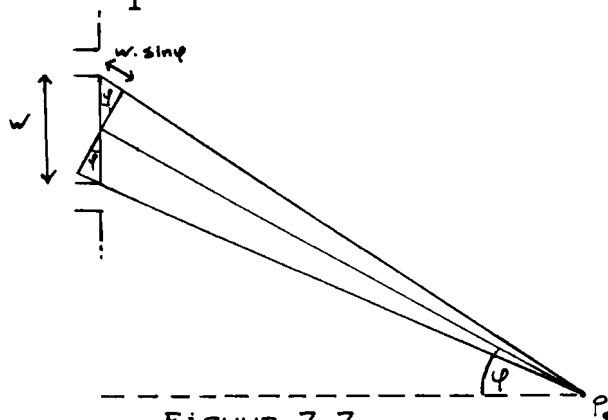
De momentane druk van een enkel element wordt bepaald door middel van de tweepuntsmethode van Peter Wardenier (vergl. 7.4 t/m 7.6). De druk in een punt x , veroorzaakt door één element op tijdstip T is dan:

$$P_e = A_i \cdot [P_0(t_a) - P_0(t_b)] \cdot \cos \theta / (\sin \theta \cdot R_i)$$

$$\text{waarbij } t_a = T - R_i/c - \delta t_i + w \cdot \sin \theta / 2c$$

$$\text{en } t_b = T - R_i/c - \delta t_i - w \cdot \sin \theta / 2c$$

(zie figuur 7.7).



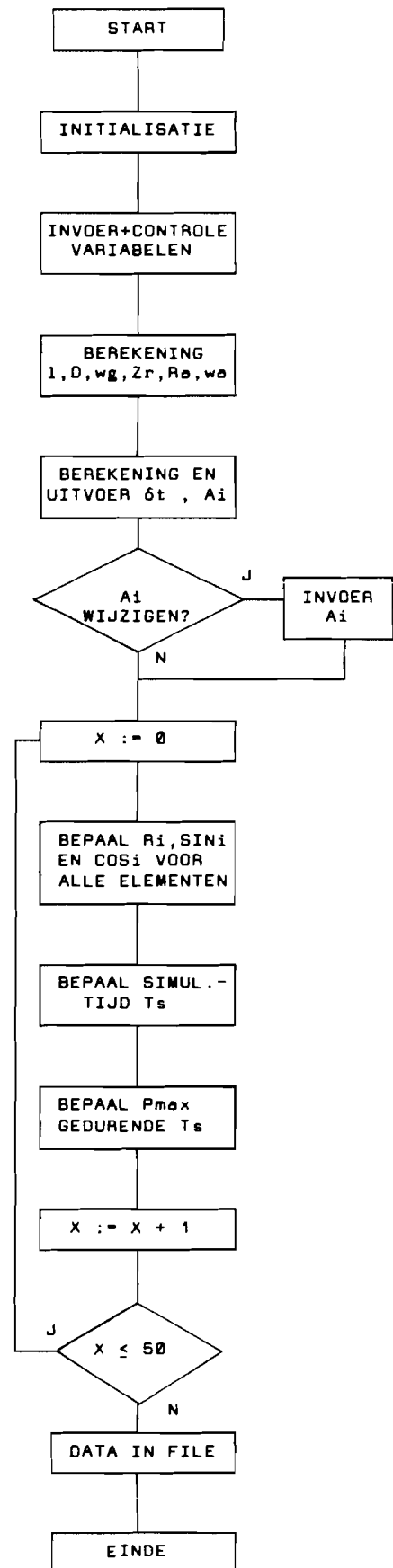
Figuur 7.7

De rest van het programma GAUSS is te zien in het flow-diagram hiernaast. De variabelen die in dit flow-diagram staan, zijn terug te vinden in de vorige paragraaf. Het bepalen van P_{max} gebeurt door eerst de simulatietijd T_s te bepalen. T_s begint zodra de eerste drukgolf in X aankomt en eindigt, als de laatste drukgolf is gepasseerd. Door de tijd T_s op te delen in stukken van $1/(20.F)$, waarbij F de frequentie is waarmee de elementen worden aangestuurd. Op elk tijdsinterval wordt vervolgens de druk bepaald en de maximale waarde wordt bewaard.

Dit wordt gedaan voor 101 punten op de te berekenen lijn, waarbij een punt op plaats X ($-50 \leq X \leq 50$), vanwege de symmetrie, dezelfde maximale druk krijgt als een punt op de plaats $-X$.

Op het einde van het programma worden de verkregen gegevens naar een file weggeschreven, zodat later - eventueel samen met andere datafiles - het drukverloop bekeken kan worden. Samen met de data wordt ook het aantal elementen, de brandpuntsafstand, de observatieafstand e.d. weggeschreven.

Het programma GAUSS heeft voor het berekenen van één lijn op een afstand van ca. 50 mm, met 8 elementen met $w = 1,02\text{mm}$, $d = 1,27\text{mm}$, brandpunt op 50mm en frequentie = 1,5MHz op een PC met 8087 co-processor ongeveer 5 min. nodig. Een simulatie dicht bij het array duurt nog langer: op 5mm ca. 8 min. Verder van het array wordt de rekentijd steeds korter (150mm : ca. 3 min.).



Figuur 7.8

7.3 De koppelfactor.

Het programma GAUSS is omgeschreven naar het programma KOPPEL. Hiermee kan bekeken worden, wat voor effect het heeft op de drukvelden, als de elementen van het array om-en-om aangestuurd worden. Aangezien het te verwachten is, dat bij een dergelijke aansturing de elementen die niet aangestuurd worden toch enigszins gaan meetrillen - zowel door elektrische koppeling als door mechanische koppeling - biedt dit programma de mogelijkheid deze koppeling mee te nemen in de simulaties.

Er wordt hier gesproken van twee soorten koppeling: elektrische en mechanische koppeling. In principe moeten beide soorten koppeling apart berekend worden. Aangezien dit de snelheid van het programma niet bepaald ten goede komt, is de volgende vereenvoudiging gemaakt, die de resultaten waarschijnlijk slechts weinig zal beïnvloeden:

Aangenomen wordt, dat zowel in de elektrische koppeling als in de mechanische koppeling geen tijdsvertraging of vervorming optreedt, maar alleen een verzwakking. Dit betekent dus, dat een element dat slechts trilt door koppeling van één naburig element ook in fase met dat element trilt.

Dat dit geldt bij een elektrische koppeling (bijvoorbeeld door (lek-)weerstand) is eenvoudig in te zien. Bij een mechanische koppeling treedt in principe wel een faseverschil op, door de looptijd van de trilling door het materiaal. Doordat de elementen echter dicht bij elkaar zitten en de geluidssnelheid in het (backing-)materiaal vrij hoog is, zal de vertraging van het signaal verwaarloosbaar zijn.

Verder heeft alleen koppeling plaats tussen naburige elementen; de koppeling die elementen ondervinden van elementen die niet direct naast hun liggen wordt verwaarloosd (wat ook vrij redelijk is: bij een koppelfactor van 10% wordt slechts een fout van 1% gemaakt).

De wijzigingen die nodig zijn om van het programma GAUSS het programma KOPPEL te maken zijn de volgende:

- * om te beginnen moet de koppelfactor, CE, ingevoerd kunnen worden (toegestane waardes : $0 < CE < 0,5$).
- * als bijvoorbeeld 8 elementen aangestuurd worden, moet de berekening voor 17 ($2 * 8 + 1$) elementen worden uitgevoerd.
- * Niet aangestuurde elementen zenden het signaal van hun linker en rechter buurman uit, echter verzwakt met de koppelfactor.

Verder verloopt het programma KOPPEL identiek aan het programma GAUSS. Ook de uitvoerfile heeft exact hetzelfde formaat als GAUSS, zodat in bijvoorbeeld een tekenprogramma de data zonder meer met elkaar vergeleken kan worden.

De tijd die nodig is om de druk over een lijn te berekenen blijkt vijf maal zo groot te zijn als bij het programma GAUSS: op 5mm doet het programma ca. 40 min. over één lijn; op 150 mm ca. 15 min.

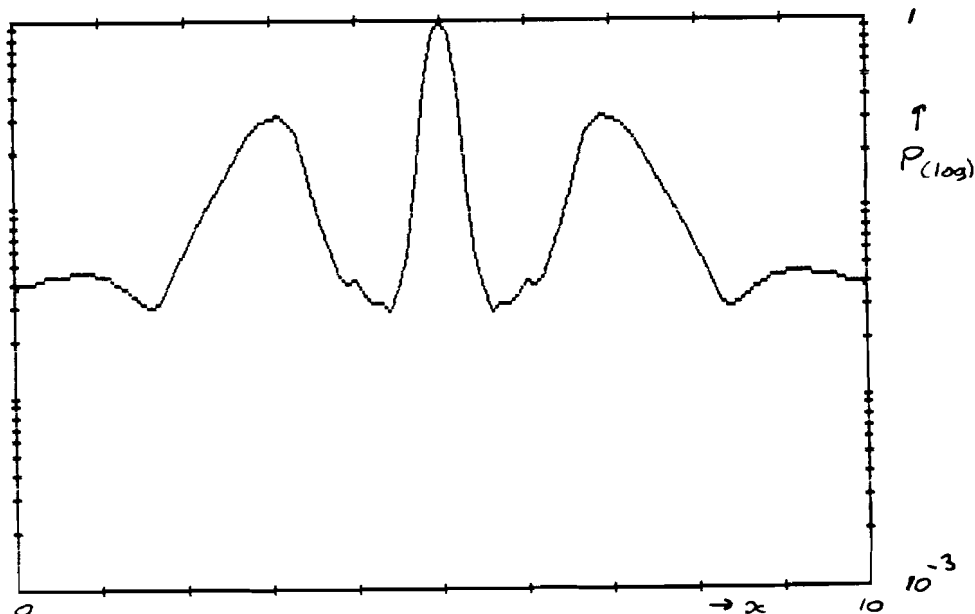
8. Tekenprogramma's

De simulatieprogramma's uit het vorige hoofdstuk leveren slechts een file op met data, waaruit zo zonder meer niet veel is af te leiden. Om deze data wat sneller en eenvoudiger te interpreteren zijn drie tekenprogramma's geschreven, die de data in grafiekvorm op het beeldscherm brengen. Deze programma's heten TEKEN, TEKEN3DD en ISOBAR.

Met het eerste programma is het mogelijk om één of meer datafiles op het scherm te tekenen. De horizontale as geeft de plaats op de observatielijn aan, op de verticale as is de druk uitgezet, genormeerd met het maximum op 1 en logaritmisch tot minimaal 10^{-3} (-60 dB). In figuur 8.1 is een dergelijke figuur te zien.

Aan het programma zelf valt weinig uit te leggen, omdat het vrij rechthoekig is; het grootste gedeelte van het programma bestaat uit het tekenen van de assen met de schaalverdeling.

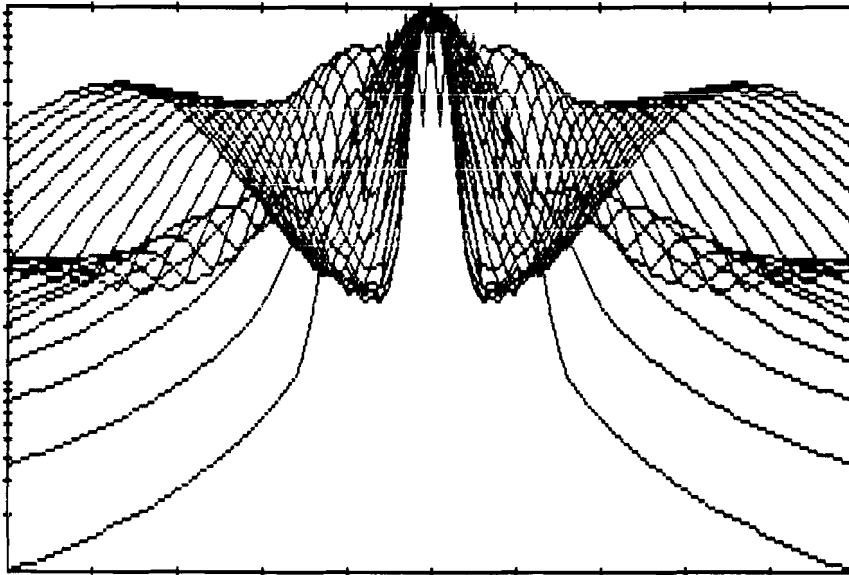
NORMWAARDE IS	:	1.5605850000E+00	AANTAL EL	:	17
FOCUS	:	5.0000000000E+01	EL. BREEDTE	:	1.0200000000E+00
AFSTAND Z-VLAK	:	5.0000000000E+01	INTER EL. AFST.:	:	1.2700000000E+00
KOPPELFACTOR IS	:	0.0000000000E+00			



Figuur 8.1

8.1 3-D tekeningen

Met het programma TEKEN is het alleen mogelijk om drukcurves ieder apart of over elkaar heen te tekenen. Hiermee is het erg lastig om een goed beeld te krijgen van het complete geluidsveld. In figuur 8.2 is te zien wat er gebeurt als 20 drukcurves, ieder op een andere afstand van het array, gewoon over elkaar worden getekend; hieruit valt nauwelijks meer iets op te maken.



Figuur 8.2

Er zal dus een andere manier gevonden moeten worden, om de data van een compleet veld te representeren. Hiervoor zijn twee manieren uitgewerkt. In deze paragraaf zal bekeken worden hoe de data (schijnbaar) drie-dimensionaal gerepresenteerd kan worden. Hierbij wordt het veld beschouwd als een soort heuvellandschap, waarbij dan de hoogte van de heuvels afhangt van de druk op die plaats. In de volgende paragraaf (8.2) wordt bekeken hoe door middel van 'hoogtekaarten' informatie over het veld verstrekt kan worden.

8.1.1 Hoe van 3-D naar 2-D tekeningen?

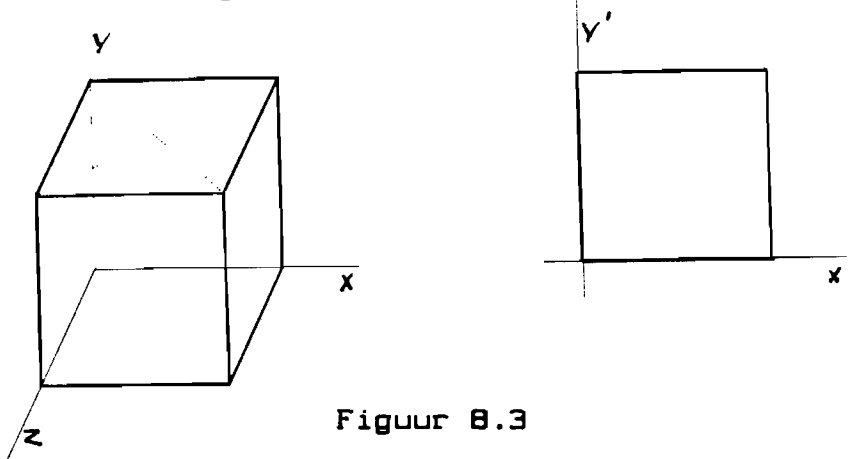
Als we drie-dimensionale data op een scherm willen weergeven, dan krijgen we het probleem, dat een beeldscherm slechts

twee-dimensionaal is; evenzo het papier waarop de plaatjes afgedrukt moeten worden. Er zal dus een bepaalde projectie plaats moeten vinden, waarbij een drie-dimensionale figuur afgebeeld wordt op een twee-dimensionaal vlak; echter zodanig, dat nog wel de indruk van een drie-dimensionaal voorwerp blijft bestaan.

We maken hiertoe gebruik van een (in principe) eenvoudige afbeeldingsfunctie, welke geïllustreerd wordt met een afbeelding van een kubus (welke hier steeds '3-D' wordt getekend). Deze afbeeldingsfunctie komt neer op een projectie, loodrecht op de Z-as (de Z-coördinaat wordt op nul afgebeeld):

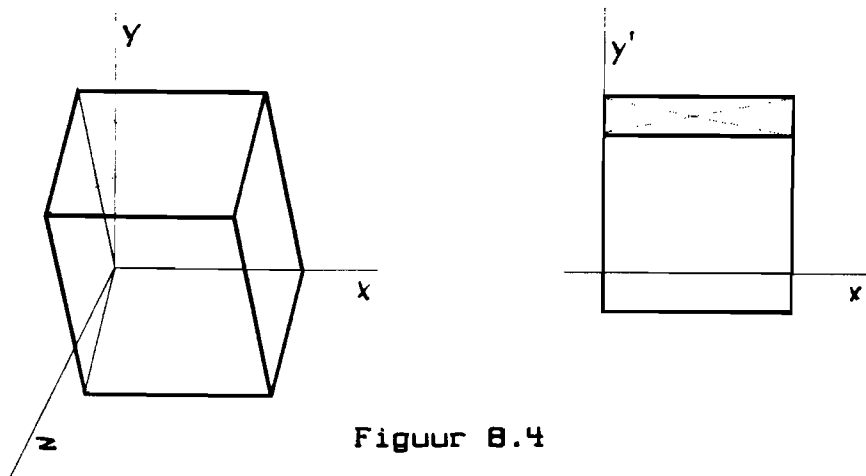
$$F(x,y,z) \rightarrow (x',y',0)$$

De kubus wordt dan afgebeeld als een vierkant vlak (zie fig. 8.3)



Figuur 8.3

Vervolgens gaan we de kubus draaien om de x-as over een hoek θ . Deze gekantelde kubus geeft als twee-dimensionale projectie twee rechthoeken, waarvan één de voorkant van de kubus en één de bovenkant van de kubus voorstelt (zie figuur 8.4).



Figuur 8.4

Als we de kubus tenslotte om de y-as gaan draaien om een hoek θ , dan krijgen we als projectie een figuur, die (net als voorgaande linkse plaatjes) een indruk geeft een kubus drie-dimensionaal weer te geven.

Het enige wat we dus hoeven te doen, is een afbeeldingsfunctie $G(x,y,z) \rightarrow (x',y',z')$ vinden, die een draaiing om de x- en y-as verwezenlijkt. Deze functie moet dan slechts voor de x' en de y' coördinaten worden bepaald (omdat de z'-coördinaat uiteindelijk toch op nul wordt afgebeeld).

Uiteindelijk geldt dan:

$$x' = x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta \cdot \sin\theta + z \cdot \sin\theta \quad (8.1^a)$$

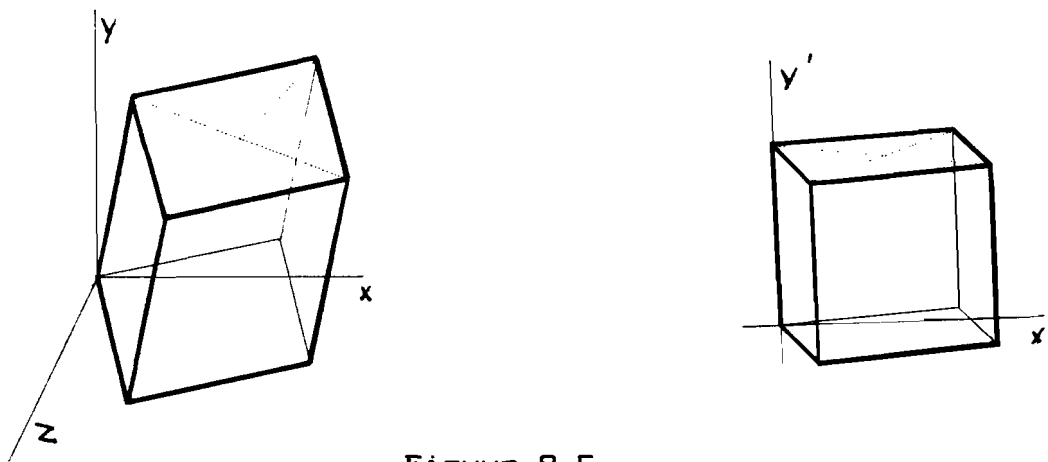
$$y' = x \cdot \sin\theta \cdot \sin\theta + y \cdot \cos\theta + z \cdot \sin\theta \quad (8.1^b)$$

Het blijkt echter, dat de drie-dimensionaal getekende figuren er 'beter' of 'echter' uitzien, als in vergelijking 8.1^a de term bij de y gelijk wordt aan nul, zodat we de volgende vergelijkingen krijgen:

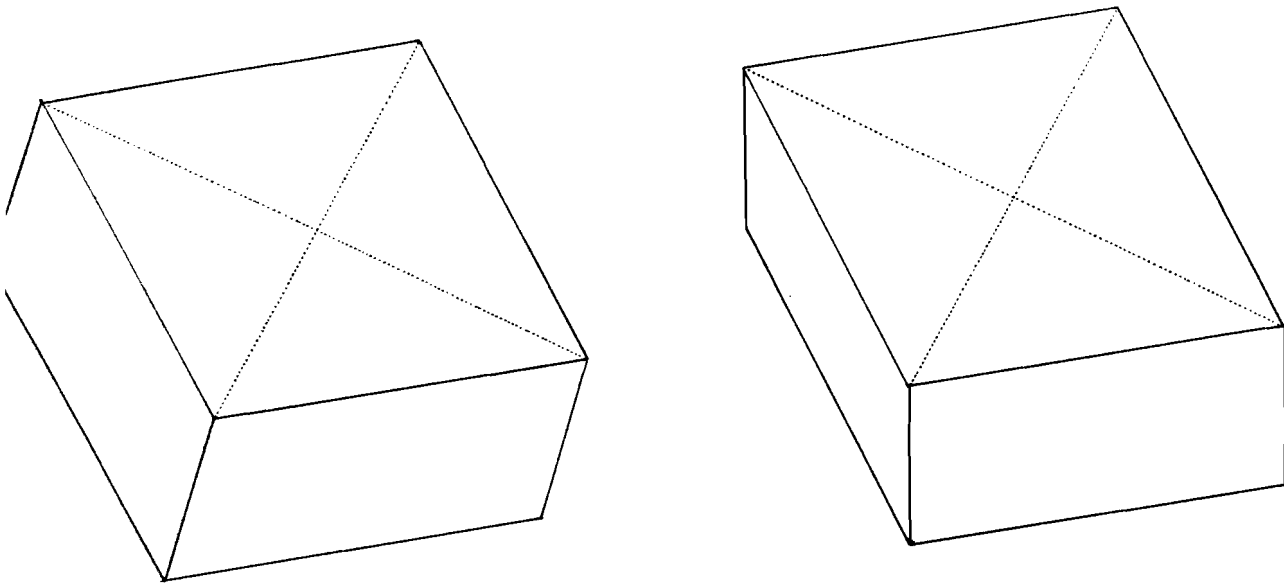
$$x' = x \cdot \cos\theta + y \cdot 0 + z \cdot \sin\theta \quad (8.2^a)$$

$$y' = x \cdot \sin\theta \cdot \sin\theta + y \cdot \cos\theta + z \cdot \sin\theta \quad (8.2^b)$$

Deze vergelijkingen geven een afbeelding van de kubus, zoals in figuur 8.5 is te zien. In figuur 8.6 zijn beide afbeeldingsmethodes naast elkaar gezet, zodat het verschil tussen vergelijkingen 8.1 en 8.2 goed te zien zijn.

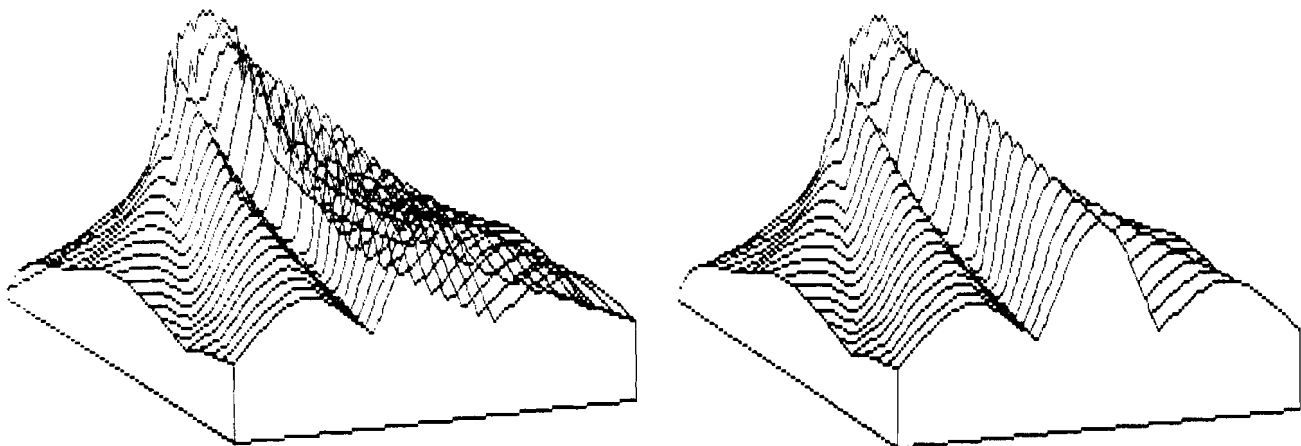


Figuur 8.5



Figuur 8.6

We kunnen nu een drie-dimensionaal voorwerp op een twee-dimensionaal vlak afbeelden. Echter, de figuren in deze paragraaf zijn met de hand getekend, zodanig dat lijnen die zichtbaar horen te zijn dik zijn getekend; en lijnen die onzichtbaar horen te zijn dun zijn getekend. Dit is lastig in formulevorm te zetten, echter door een slim algoritme toe te passen, kunnen we alleen die lijnen tekenen die in werkelijkheid ook zichtbaar moeten zijn; lijnen die achter het 'voorwerp' vallen worden dan niet getekend. Een algoritme dat hier voor zorgt wordt in het algemeen een HIDDEN-LINE algoritme genoemd. In figuur 8.7 is te zien wat het effect is van het toepassen van het hidden-line algoritme (links zonder, rechts met hidden-line).



Figuur 8.7

8.1.2 Het programma TEKEN3DD

We hebben in de voorgaande paragraaf gezien, hoe we drie-dimensionale data kunnen afbeelden op een twee-dimensionaal vlak. Het is dan niet meer zo moeilijk om een programma te schrijven, waarmee de data van de simulatieprogramma's gerepresenteerd kan worden. Wat gerealiseerd moet worden, is dat de te tekenen figuur altijd op het beeldscherm past (window fitting), dat alleen 'zichtbare' lijnen op het beeldscherm getekend worden en dat de echte X,Y coördinaten omgezet moeten worden naar pixels op het beeldscherm. Hoe dit in het programma TEKEN3DD gerealiseerd wordt, zal in deze paragraaf worden uitgelegd.

Wat nog opgemerkt moet worden, is dat de curves, die worden ingelezen, niet zodanig genormeerd worden, dat van elke curve het maximum altijd op 0 dB ligt (zoals bij het programma TEKEN het geval was). Als 0 dB punt wordt het maximum van alle drukcurves gekozen. Ten opzichte van dat punt worden de overige curves genormeerd.

* Window fitting.

Doordat de data die wordt ingelezen altijd zodanig genormeerd wordt, zodat de minimale en maximale waarden altijd tussen -1 en +1 inliggen (maar daar niet aan gelijk hoeven te zijn), kan gegarandeerd worden, dat de te tekenen 3-D figuur altijd binnen een blok ter grootte van het beeldscherm past. Vervolgens zorgt het programma ervoor, dat de figuur ook inderdaad overal binnen de randen van het scherm blijft, door twee offset-parameters te bepalen; één voor de x-richting, en één voor de y-richting. Door een aantal geschikte punten van de te tekenen figuur te nemen, wordt gekeken of de figuur - bij de default offset - binnen het scherm blijft. Valt de figuur ergens buiten het scherm, dan worden één of beide parameters aangepast, zodanig dat de figuur weer binnen het scherm valt. Als controle-punten worden de hoekpunten van het grondvlak genomen en de grootst mogelijke waarde die de 'hoekpunten' van het bovenvlak aan kunnen nemen.

* Hidden line.

Het hidden-line algoritme wordt gerealiseerd door de figuur van 'voor' naar 'achter' te tekenen. Door telkens (pixel voor pixel) bij te houden, wat van de tot dan toe op het scherm getekende figuur de hoogste lijn is, wordt een grens bepaald: komt een lijn boven die grens, dan mag deze lijn getekend worden; komt de lijn onder die grens, dan mag die lijn niet getekend worden. Na elke getekende lijn wordt de grens aangepast aan de nieuwe situatie.

* Omzetten naar 'pixel-adres'.

In het programma wordt gewerkt met een coördinatenstelsel dat grote overeenkomsten vertoont met het 'normale' cartesisch coördinatenstelsel. Het beeldscherm maakt echter gebruik van een eigen assenstelsel. Het scherm is verdeeld in 200 pixels in de y-richting en 640 pixels in de x-richting. We hebben daar dus te maken met een assenstelsel dat loopt van (0,0) tot (640,200) met slechts natuurlijke getallen. Verder ligt de oorsprong (0,0) niet linksonder, maar linksboven.

De vertaalslag van 'normaal' assenstelsel naar beeldscherm assenstelsel wordt pas op het laatst gemaakt (op het moment dat getekend moet worden).

Op de volgende pagina's tenslotte zijn vier tekeningen te zien (figuur B.8), waarbij telkens iets is veranderd. Linksboven (als de pagina is gekanteld) is een plaatje te zien, waarbij de hidden-line routine is weggelaten; rechts daarvan hetzelfde plaatje met hidden-line.

Linksonder is het effect te zien van het gebruik van vergelijkingen B.1 als projectie, rechtsonder hetzelfde plaatje, maar dan met vergelijkingen B.2.

Tenslotte is rechtsboven hetzelfde plaatje getekend als rechtsonder, alleen onder een andere gezichtshoek. Bij het plaatje rechtsboven is daardoor de tweede zijlob goed te zien, bij het plaatje rechtsonder is de eerste zijlob en de hoofdbundel beter te zien.

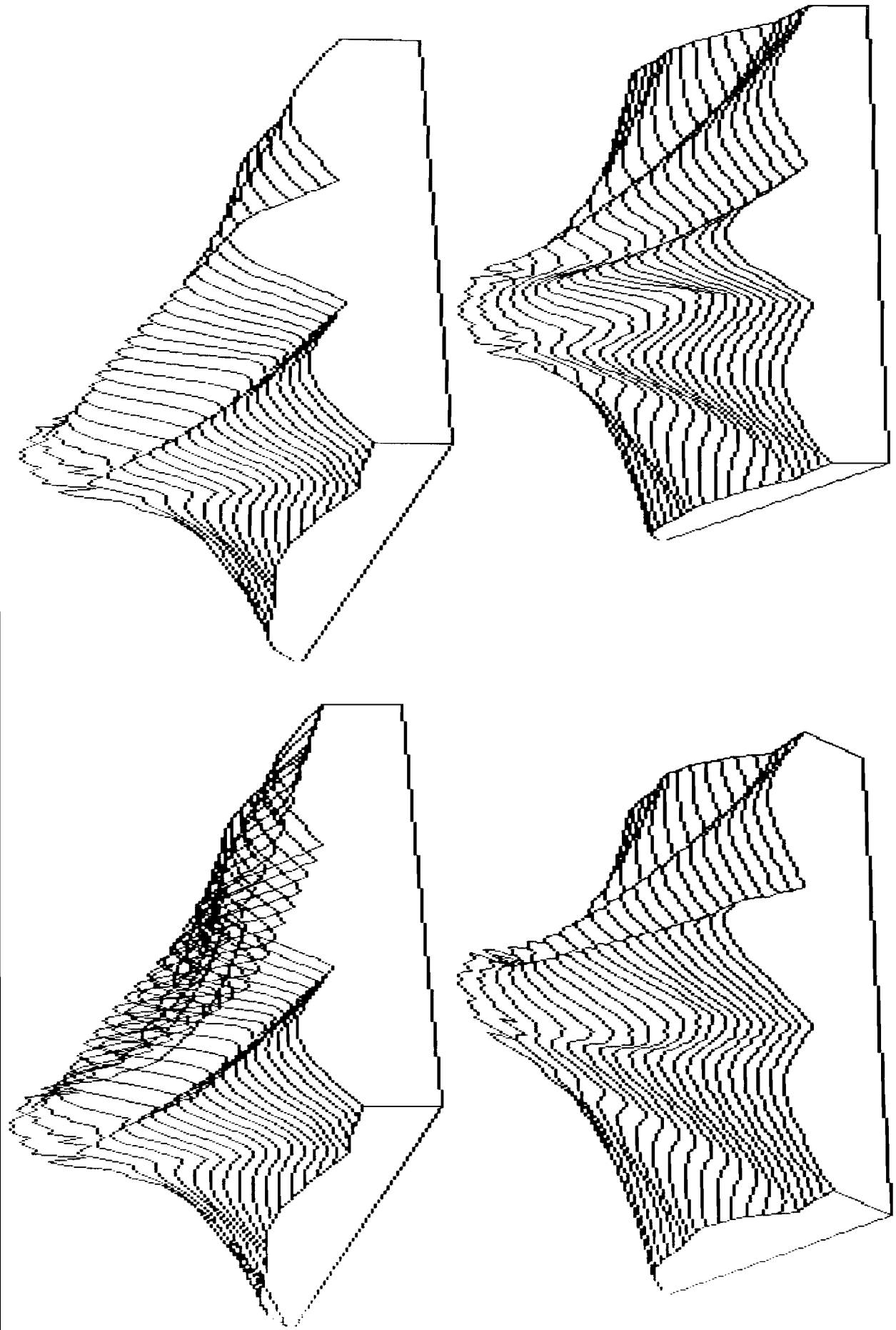


Figure 8.8

8.2 Hoogtekaarten

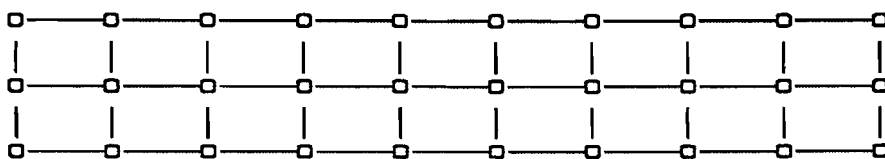
Het 3-D programma, dat in de vorige paragraaf is besproken, levert plaatjes op, die een aardig kwalitatief idee geven over het geluidsveld. Het is in die plaatjes echter lastig om te zien hoe groot de maximale druk in een bepaald gebied is. Hiertoe is het programma ISOBAR geschreven, dat plaatjes geeft, waaruit wel kwantitatieve informatie is te halen.

De plaatjes die ISOBAR geeft kunnen op twee manier getekend worden. De eerste manier geeft een plaatje, waarbij op elke lijn, evenwijdig aan het array, de maximale druk op 0 dB wordt gesteld. De tweede manier is een echt isobaren-plaatje (waarin niet evenwijdig aan het array is genormeerd), waarbij als 0 dB-punt het maximum wordt genomen op een lijn op 5 mm van het array. In paragraaf 8.2.2 worden deze manier verder besproken.

Het programma ISOBAR tekent alleen lijnen, waarbij gēen waardes bij de lijnen worden geplaatst. Om te weten te komen, welke druk bij welke lijn hoort, is het programma ISOBARJE geschreven, dat hetzelfde doet als ISOBAR, echter met per plaatje slechts ēen set isobaren van gelijke druk. In hoofdstuk vijf is te zien hoe ISOBAR en ISOBARJE bij elkaar gebruikt kunnen worden.

8.2.1 Hoe wordt een hoogtekaart getekend?

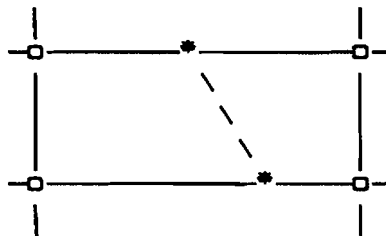
We willen hier een hoogtekaart gaan tekenen, uitgaande van een matrix van 'hoogten' (hier dus drukken). We kunnen dus zeggen, dat we een veld van rechthoekjes hebben, waarvan de hoekpunten een bekende waarde hebben (zie figuur 8.9).



Figuur 8.9

We kunnen nu op twee manieren hoogtelijnen door deze matrix gaan leggen. Bij de eerste manier wordt op elke zijde van elke rechthoek een punt gezocht waar de hoogtelijn doorheen zou kunnen lopen. Als we dus een -3 dB lijn willen tekenen, dan kijken we op elke zijde of daar een -3 dB punt ligt. Dit is het geval, als één hoekpunt groter is dan -3 dB en het andere kleiner.

Als we nu een rechthoek vinden met precies twee randen die een snijpunt met de hoogtelijn hebben, dan kunnen we in dat rechthoekje een stukje hoogtelijn tekenen. Dit gaat zo door, totdat alle hoogtelijnen en alle rechthoekjes aan de beurt zijn geweest.



Figuur 8.10

Nu bestaat echter de mogelijkheid, dat een rechthoekje één, drie of vier snijpunten heeft met één hoogtelijn. Dan is het niet meer mogelijk om een stukje hoogtelijn door deze rechthoek te trekken. Een hoogtekaart die op deze manier gemaakt is, kan dus 'lege' plekken vertonen.

De tweede manier om een hoogtekaart te tekenen heeft dit nadeel niet. We gaan hier als volgt te werk:

Uitgaande van de bestaande matrix met data, gaan we tussen elke twee matrixpunten (zowel in horizontale als in verticale richting) punten interpoleren. Hierbij worden (in elke richting) juist zoveel punten tussen elke twee naast elkaar gelegen matrixpunten geïnterpoleerd, dat een matrix ontstaat die zo groot mogelijk is, maar kleiner is dan het pixelveld van het beschikbare beeldscherm. In figuur 8.11 is te zien hoe geïnterpoleerd wordt (p1, p2, p3 en p4 bekend).

p1		X				p2	
		P					
p3		Y				p4	

Figuur B.11

Voor X geldt : $X = p1 + (p2 - p1) * 2 / 6$

voor Y geldt : $Y = p3 + (p4 - p3) * 2 / 6$

zodat : $P = X + (Y - X) * 1 / 6$

Deze methode is ook wel bekend onder de naam 'Bivariate vierpunts interpolatie' en in zijn algemeenheid is te schrijven:

$f(x_0 + ph, y_0 + qh) =$

$$(1-p)(1-q)f_{0,0} + p(1-q)f_{1,0} + q(1-p)f_{0,1} + pqf_{1,1} + O(h^2)$$

waarbij $O(h^2)$ staat voor hogere orde termen, die verder verwaarloosd worden.

In het voorbeeld is meteen te zien, hoe in een algoritme zo'n matrix opgevuld wordt: eerst worden de horizontale lijnen van p1 naar p2 en van p3 naar p4 opgevuld door interpolatie, vervolgens alle verticale lijnen: van p1 naar p3, ... van X naar Y, ... en van p2 naar p4.

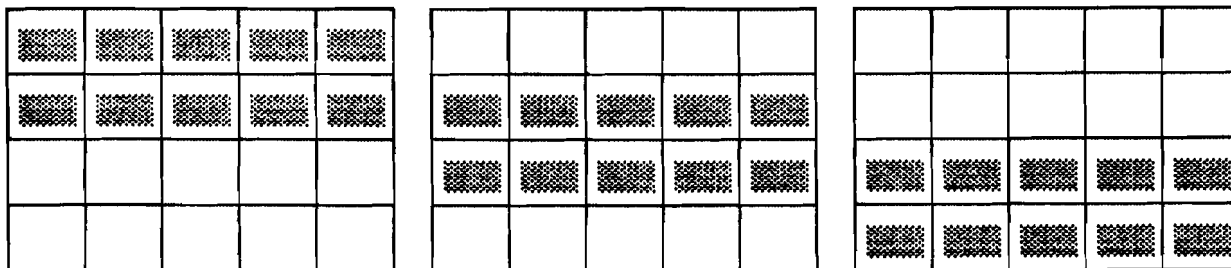
Voor de waarde van P maakt het niet uit of eerst de horizontale of eerst de verticale lijnen worden berekend: de berekening is volledig symmetrisch.

Als zo het gehele veld is berekend, kunnen de hoogtelijnen getekend worden. Om een hoogtelijn met hoogte H te tekenen, wordt (voor alle punten) gekeken, of een bepaald punt (een bepaald pixel) een waarde heeft die groter of gelijk is aan H , terwijl één van zijn direct aangelegen burens een waarde heeft die kleiner is dan H . Is dat het geval, dan wordt op het scherm dat pixel opgevuld. In algoritme-vorm:

```
FOR alle H DO
  FOR alle pixels DO
    IF pixel  $\geq$  H AND (er is een buur  $<$  H) THEN pixel aan;
```

8.2.2 Het programma ISOBAR.

Het programma ISOBAR is na paragraaf 8.2.1 niet moeilijk meer. Het programma zoekt zelf uit hoe groot de matrix maximaal kan zijn en vult die vervolgens in. Het enige speciale aan het programma is, dat wegens de beperkte geheugenruimte de matrix niet in één keer berekend kan worden. Dit gebeurt in een aantal stappen. Er zitten steeds slechts drie van de mogelijke dertig berekende druklijnen in het geheugen. Door steeds slechts een strook van de matrix te gebruiken en die over het gehele veld te verschuiven, kan toch het volledige veld berekend worden (zie figuur 8.12).



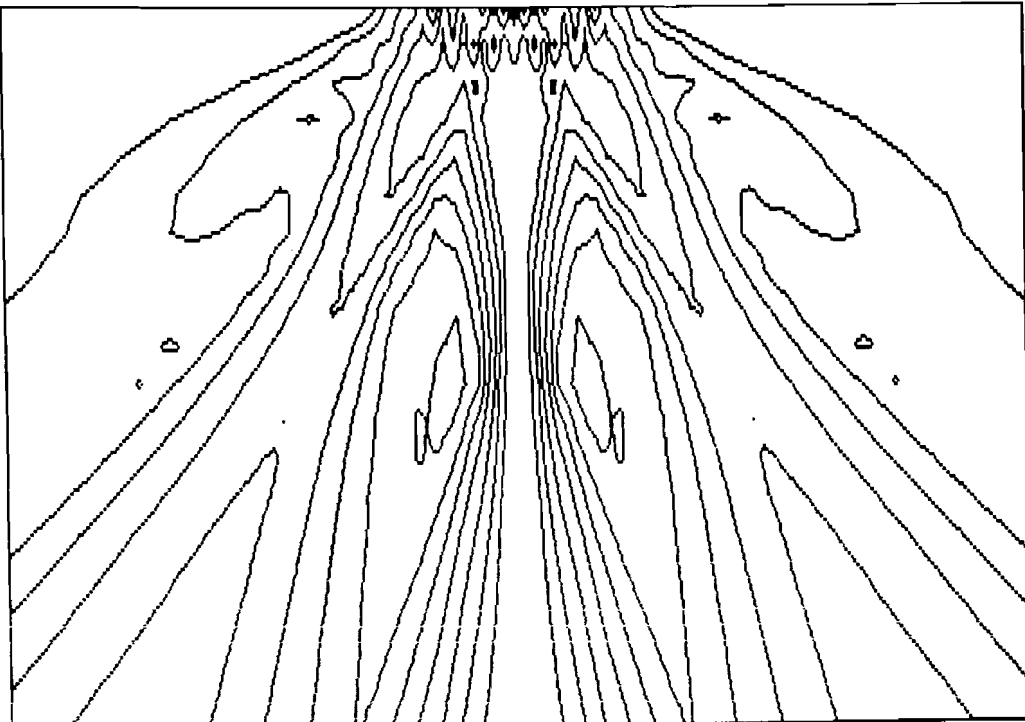
Figuur 8.12

Met het programma ISOBAR kan van een veld op twee manieren een hoogtekaart gemaakt worden. De eerste manier (waarmee in dit verslag de meeste plaatjes zijn gemaakt) maakt een hoogtekaart, waarbij het maximum van elke ingelezen lijn op 0 dB wordt genomen. Dit betekent dus, dat in de plaatjes op elke horizontale lijn tenminste één 0 dB punt ligt en dat de overige punten van een lijn onder de 0 dB liggen.

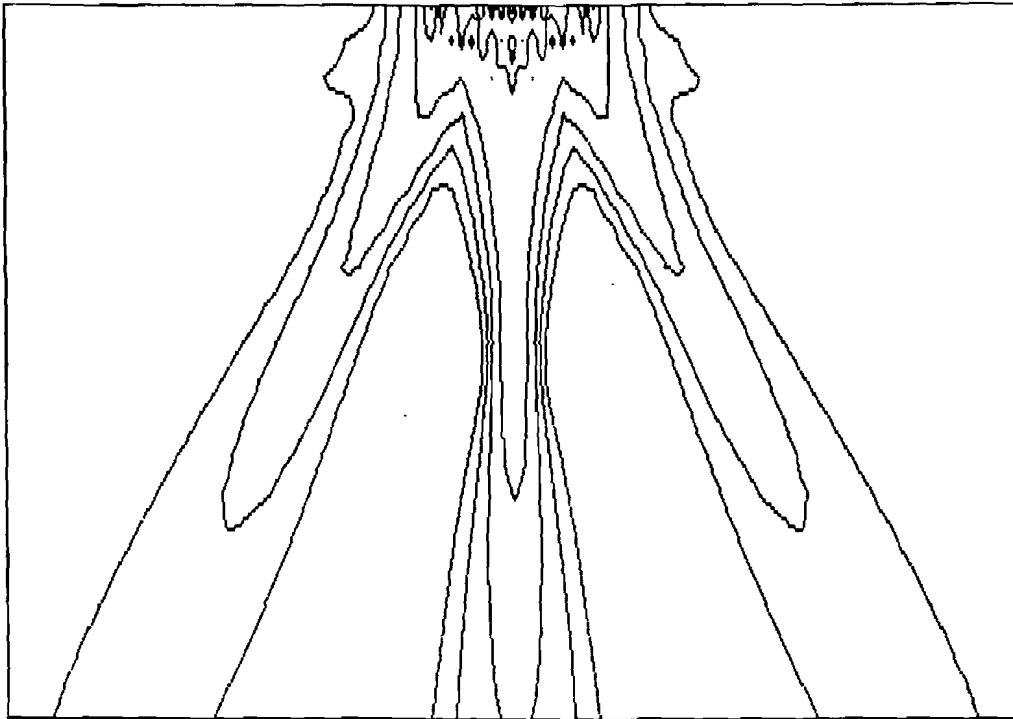
Bij de tweede manier worden de ingelezen lijnen niet zodanig genormeerd, dat elke lijn het maximum op 0 dB heeft; alleen van de lijn die het dichtste bij het array ligt (op 5 mm van het array) wordt het maximum op 0 dB genomen. De verschillende drukken worden hierbij ten opzichte van het absolute maximum gedefinieerd.

De eerste methode geeft een goed inzicht in de vorm van de hoofdbundel. Verder is deze tekenmethode te vergelijken met de gemeten drukvelden van figuur 5.6 en 5.7.

De tweede methode geeft de zijlobben (die bij de eerste methode vaak slecht te zien zijn) een stuk beter weer. Verder wordt een indruk verkregen, hoe het drukniveau verder van het array afneemt. In figuur 8.13 is een isobarenplaatje te zien volgens de eerste methode en in figuur 8.14 een isobarenplaatje volgens de tweede methode.



Figuur 8.13



Figuur 8.14

Het programma ISOBAR tekent isobaren op -3 dB, -6 dB, -10 dB, -15 dB, -20 dB, -25 dB en -30 dB.

9. Conclusies en aanbevelingen.

Naar aanleiding van de resultaten van mijn afstudeerwerk, meen ik de volgende conclusies te kunnen trekken:

Het blijkt mogelijk om met een array een geluidsbundel te focuseren; wil men echter duidelijke resultaten zien van het focuseren, dan is het nodig om (bij de hier gebruikte frequentie van 1,5 MHz) een apertuur te gebruiken van ca. 20 mm. Bij het gebruik van een apertuur van 10 mm zal de geluidsbundel moeilijk merkbaar te focuseren zijn; de geluidsbundel behoudt bij een dergelijke - relatief kleine - apertuur echter wel een aanvaardbaar smalle breedte.

Om een grotere apertuur te krijgen, is het niet noodzakelijk meer elementen aan te sturen. Het is mogelijk, door de elementen om-en-em aan te sturen, een redelijk goed gefocusseerde geluidsbundel te krijgen.

Zijlobben die ontstaan, door de grotere inter-elements afstand bij het om-en-om aansturen, worden kleiner als er een (elektrische) koppeling tussen de elementen aanwezig is.

Het is goed mogelijk om de scanbeweging - die tot nu toe nog steeds mechanisch plaatsvindt - elektronisch te realiseren met behulp van een array en redelijk compacte elektronica. Bij deze scanbeweging kan een eventuele focussing van de array behouden blijven. Verder is het mogelijk met een array sneller en nauwkeuriger te scannen dan met mechanisch verplaatste transducers.

Aanbevelingen:

De schakeling die thans de scanbeweging realiseert (voor 16 elementen) zal vlak bij het array geplaatst moeten worden om te dikke draadbomen te voorkomen.

De besturing van de scan-elektronica zal softwarematig plaats moeten vinden, in het programma dat ook de rest van de meting bestuurt.

De multiplexer kan (vrijwel direct) in de Lineaire Array Transducer worden geplaatst, zodat de zendelektronica bij elkaar in één kast kan blijven zitten.

Verder moet de ontvangstkant nog bekeken worden: het is mogelijk, dat er een betere manier van ontvangen is, dan door met één array-element te gaan scannen.

Tenslotte zal een beter en betrouwbaarder array gebruikt moeten worden, dat óf hier gefabriceerd kan worden (en waarvoor in dit verslag een aantal aanwijzingen staan), óf ergens (zonder elektronica) aangeschaft kan worden.

Als een nieuw array gemaakt wordt, is het waarschijnlijk verstandig om de mogelijkheden van PVDf-folie als piezo-elektrisch materiaal te bekijken

Literatuurlijst

- [1] Albert Freedman.
Sound Field of Plane Gently Curved Pulsed Radiators.
J. Acoust. Soc. Amer. vol. 48, (1970), pp. 221 - 227.
- [2] Albert Freedman.
Farfield of Pulsed Rectangular Acoustic Radiator.
J. Acoust. Soc. Amer. vol. 49, (1971), pp. 738 - 748.
- [3] M. Alonso, E.J. Finn.
Fundamentele Natuurkunde 3.
Golven. pp. 276- 281. Elsevier, Amsterdam, 1973.
- [4] F.J. Fry.
Ultrasound: its applications in medicine and biology, part 1
Methods and phenomena 3.
Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam - Oxford -
New York 1978
- [5] F.J. Fry.
Ultrasound: its applications in medicine and biology, part 2
Methods and phenomena 3.
Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam - Oxford -
New York 1978
- [6] C.Bruneel, B.delannoy, R.Torguet, E.Bridoux, H.Lasota.
Electrical coupling effects in an ultrasonic transducer
array.
Ultrasonics 17, (1979), pp. 255 - 260.
- [7] Andre J. Duerinckx.
Matched Gaussian Apodization of Pulsed Acoustic Phased
Arrays.
Ultrasonic Imaging 2, (1980), pp. 338 - 369.

- [8] Kenneth N. Bates.
Tolerance Analysis for Phased Arrays
Acoustic Imaging Vol. 9, (1980), pp. 239 - 262.
- [9] Amin Hanafy.
Vibration Analysis of Single Element Transducers in Acoustic
Arrays.
Ultrasonic Imaging 3, (1981), pp. 173 - 182.
- [10] J. Fleming Dias.
Construction and Performance of an Experimental Phased
Acoustic Imaging Transducer.
Ultrasonic Imaging 3, (1981), pp. 352 - 368.
- [11] John D. Larson.
Non-ideal Radiators in Phased Array Transducers.
IEEE 1981 Ultrasonics Symposium, (GER70ULT), pp. 673 - 684.
- [12] J. Fleming Dias.
An Experimental Investigation of the Cross-Coupling between
Elements of an Acoustic Imaging Array Transducer.
Ultrasonic Imaging 4, (1982), pp. 44 - 55.
- [13] N.J. Bos
Een meetmethode voor het bepalen van de geluidssnelheid met
behulp van gepulst ultrageluid
Afstudeerverslag TH Eindhoven, maart 1983
- [14] G.S. Kino, R. Baer.
Theory for Cross-Coupling.
IEEE 1983 Ultrasonics Symposium, (GER70ULT), pp. 1013 -
1019.
- [15] R.L. Baer, G.S. Kino.
Theory for Cross Coupling in Ultrasonic Transducer Arrays.
Appl. Phys. Lett. 44, (1984), pp. 954 - 956.

[16] W.J.J. Baas.

De analyse en verbetering van een meetmethode voor ultrasone looptijd-tomografie.

Afstudeerverslag TH Eindhoven, december 1984.

[17] P.H. Wardenier.

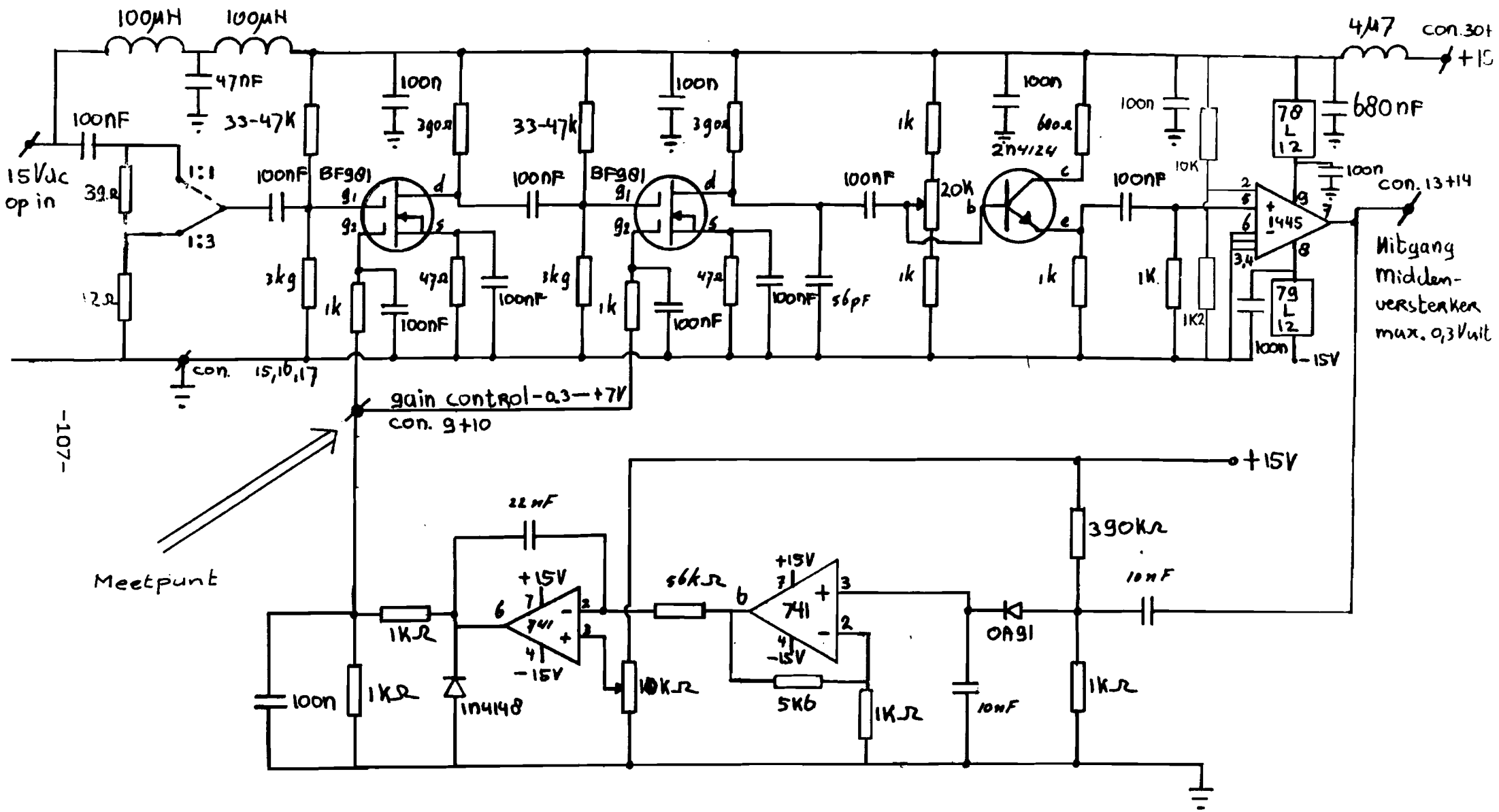
Analyse, ontwerp en bouw van een lineair akoestisch array t.b.v. een experimentele meetopstelling voor ultrasone tomografie.

Afstudeerverslag TH Eindhoven, mei 1985.

Appendix 1.

De versterker in de meetkast.

(Lit.[13])



-107-

Meetpunt

MIDDENVERSTERKER nov. 84

Appendix 2.

De GCV als functie van de ingangsspanning.

