

A. J. BERKHOUT EN G. J. KLEINHOONTE VAN OS

AKOESTISCH ONDERZOEK IN DELFT; VERLEDEN, HEDEN EN TOEKOMST

Akoestiek, het gedeelte van de natuurkunde dat zich met het *geluid* bezighoudt, ontleent zijn naam aan het Griekse woord 'akouein', dat 'horen', 'luisteren' betekent. Een belangrijk deel van het huidige akoestisch onderzoek houdt zich echter ook bezig met niet-hoorbaar 'geluid'. Het Delftse akoestische onderzoek kan in de volgende vier hoofdgebieden worden ingedeeld:

- Zaal- en bouwakoestiek
- Lawaai- en trillingsonderzoek
- Akoestische echo-technieken
- Ontwerp en bouw van akoestische sensoren

De traditionele zaal- en bouwakoestiek vormt het oudste gebied. De jongste tak, de echo-akoestiek, kan zich verheugen in sterk groeiende belangstelling. In het volgende zullen, na een historisch overzicht, de belangrijkste aspecten van bovengenoemde hoofdgebieden worden besproken.

De jaren dertig

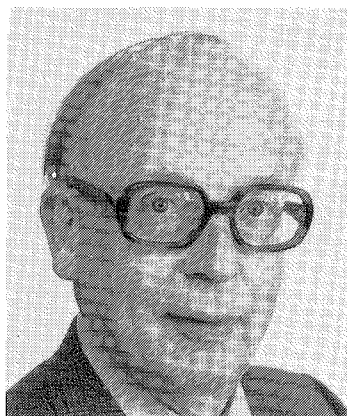
In 1930 werd het Laboratorium voor Technische Physica van de Technische Hoogeschool te Delft ingericht; twee docenten, prof. dr. C. Zwikker en prof. dr. A. D. Fokker, gaven bij hun onder-richt en hun onderzoek veel aandacht aan het geluid. In het Teylers Museum in Haarlem is nog het door Fokker ontwikkelde or-gel te vinden, waarbij een octaaf in 31 delen wordt verdeeld in plaats van, zoals gebruikelijk, in twaalf delen. Daarop kan 'zuiverder' gespeeld worden: sommige akkoorden klinken ontegenzeg-gelijk beter. Beiden speelden een belangrijke rol bij de oprich-ting van de Geluidstichting (1934), die in 1962 is omgezet in het Nederlands Akoestisch Ge-nootschap. In 1937 werd de Ne-derlandsche Bond ter Bestrijding van Geluidshinder, Anti-Lawaai Bond opgericht; acties tegen on-nodige geluidsoverlast werden gevoerd. Overigens niet altijd met succes: bij een anti-lawaai-dag in Breda werden de – schaarse – automobilisten er van over-tuigd dat overmatig toeteren nergens voor deugde. Toen zij naar huis terugkeerden werden som-migen van hen echter bekeurd

wegens het 'niet geven van een geluidssignaal bij het naderen van een kruising', zoals het Motor-en Rijwielreglement toentertijd voorschreef.

In toenemende mate deed de maatschappij een beroep op de docenten om hulp te bieden bij het oplossen van fysische proble-men, zoals het verend opstel-len van pompen ter beperking van geluidhinder en het reduce-ren van het lawaai dat bij het klin-ken van schepen optreedt en lawaaidoofheid veroorzaakt. Daarnaast was er belangstelling voor de akoestische eigen-schappen van bouwmaterialen en bouwconstructies; hinder door geluid uit buurwoningen en hinder door overmatige galm in kerken, fabrieken en kantoren werd een erkend probleem. Er werd een Delfts geluidabsorbe-rend pleister ontwikkeld en gepa-tenteerd; door de niet-ontwikkel-de fabricage werd dit helaas geen succes. In een publikatie in *De Ingenieur*, 1938, doet prof. Zwikker verslag van een onder-zoek naar geluidsisolatie van plafonds. 'Het onderzoek', zo le-zen wij, 'is verricht op gezamenlij-ke kosten van de Geluidsstich-ting en een woning-exploitant,



Dr. A. J. Berkhout studeerde elektro-techniek aan de Technische Hogeschool in Delft waar hij in 1970 promoveerde. Hij was in 1963 en in 1964 lector in de natuurkunde aan het Koninklijk Instituut voor de Marine. Van 1965 tot 1971 deed dr. Berkhout geofysisch onderzoek bij Shell International Research waar hij zich voor-namelijk bezig hield met de analyse en de verwerking van seismische gegevens. Van 1971 tot 1974 werkte hij bij Shell in Brunei. Sinds 1976 is hij hoogleraar in de seismologie en de akoestiek aan de TH Delft.



G. J. Kleinhoonte van Os (1922) stu-deerde in 1951 af als natuurkundig ingenieur aan de Technische Hogeschool Delft. Hij werkt toen al bij de Technisch Fysische Dienst TNO-TH in Delft, namelijk sinds januari 1947. Ir. Kleinhoonte van Os, sedert 1965 onderdirecteur van deze dienst, was lid of technisch secreta-ris van de in dit artikel genoemde adviescommissies. Daarnaast had hij een actief aandeel in het tot stand komen van diverse normen en aan-bevelingen op het terrein van de akoestiek en geluidbeheersing, zo-wel nationaal als internationaal.

welke laatste met nieuwe bouw-plannen rondliep en daarom wilde weten wat de eigenschap-pen waren van vroeger uitge-voerde vloeren. De totale kosten van het onderzoek bedroegen f 130,—, waarvan de Geluidsstichting en de eigenaar ieder de helft betaalden'. Elf constructies werden onderzocht; er werd een 'ideaal plafond' ontwikkeld, dat 73 kg/m² zou wegen en f 4,— per m² zou moeten kosten. Ook stofzuigers, oliebranders en autoclaxons werden onderzocht; aan het eind van deze periode vroegen de luchtalarmsirenes veel aandacht. Op 28 maart 1940

werd op een congres over de technische problemen bij geluid-alarmering over de onderzoekin-gen gerapporteerd.

Maar nu werk voor derden te veel tijd van de docenten in beslag ging nemen en dreigde de vervul-ling van de primaire taken – on-derwijs aan TH-studenten, de opleiding van natuurkundig inge-nieurs en het doen van weten-schappelijk onderzoek – in ge-vaar te brengen, werd een voor-stel opgesteld om een aparte or-ganisatie voor dit werk op te rich-ten. Dat is – in 1942 – de Tech-nisch Fysische Dienst TNO-TH geworden. Opdat prof. Zwikker

voldoende tijd aan de wetenschappelijke begeleiding van de Dienst zou kunnen geven werd dr. ir. C. W. Kosten tot lector benoemd. Hij zou een deel van de colleges van prof. Zwikker overnemen. In de TPD werd ook de Loonmeetdienst van de Geluidsstichting opgenomen: akoestisch meetwerk voor derden paste immers precies in de taakstelling van de TPD.

Meetinstrumenten en meetruimten, toen en nu

Wat geldt voor al het fysisch onderzoek geldt ook hier: een welhaast stormachtige ontwikkeling in een halve eeuw. In de jaren dertig de uit accu's gevoede versterkers en lampvoltmeters, nodig om de zwakke signalen uit microfoon of trillingopnemer te meten; geïmproviseerde meetruimten, meestal enigszins aangepaste laboratoriumkamers. Nu, sinds 1961, heeft Delft een compleet akoestisch laboratorium, met een echte reflectievrije meetkamer, met een nagalmkamer, met een stel isolatie-meetkamers die verantwoord en nauwkeurig experimenteren mogelijk maken. Ook hier een vrucht van de symbiose TH en TNO; het zou geen van de partijen alléén gelukt zijn de voor deze outillage noodzakelijke investeringen te doen.

Daarbij dient ook de 'meethal' te worden genoemd: een unieke experimenteerruimte, waar het zaalakoestisch modelonderzoek is verricht, een werkend weefgetouw onderzocht, alsmede zeer veel onderzoek aan scheepsconstructies en andere grote constructies is gedaan. De TPD kreeg de kans om ook een zogenoemd watergalmassin te bouwen, voor modelonderzoek en volle-schaal metingen aan geluidafstraling van scheepsconstructies naar het omringende water. Het bassin is ook voor andere experimenten nuttig gebleken, bijvoorbeeld voor het echoakoestische onderzoek.

De primitieve meetversterkers van weleer zijn inmiddels vervangen door het hedendaagse meetarsenaal, berustend op microcircuits met veelal digitale signaalbewerking. Het is nu mogelijk uiterst betrouwbaar de meetsignalen bij praktijkmetingen vast te leggen voor efficiënte analyse naderhand in het laboratorium. Ook zaken waarvan men destijds slechts durfde dromen zijn nu bewaarheid geworden: meten van de geluidintensiteit (dit is het vectorprodukt van geluiddruk en deeltjessnelheid); Fourier-analyse van kortstondige signalen, correlatie-berekeningen ter onderdrukking van stoorsignalen en voor het achterhalen van oorzakelijke verbanden – zij liggen nu voor het grijpen zonder het enorme tijdsbeslag dat destijds hun gebruik onmogelijk maakte. Ook de moderne mogelijkheden om veel gegevens gemakkelijk toegankelijk op te slaan in data-bestanden hebben de ontwikkeling van het vakgebied sterk gestimuleerd.

Bouwakoestiek

Geluidabsorptie, het onderwerp

van Kostens proefschrift, is intensief bestudeerd. In 'Sound Absorbing Materials' van Zwikker en Kosten is de theorie en de praktijk van de geluidabsorberende materialen en constructies te vinden: de poreuze lagen, de trillende panelen, de spleet- en de gaatjesresonatoren. Ook werd een oplossing gezocht – en gevonden – voor het probleem van de nagalm-methode: elk akoestisch laboratorium heeft een nagalmkamer, waarin geluidabsorptiemetingen worden verricht. Het was echter bekend dat de meetresultaten onderling erg verschillen: een factor twee (voor eenzelfde materiaal) was geen uitzondering. Kosten organiseerde in het raam van ISO/TC 43 (International Organization for Standardization, Technical Commission 43, Acoustics) een zogenoemde Round Robin, analyseerde de resultaten en stelde een aanscherping van de procedure voor. Een tweede Round Robin toonde aan dat hij de vinger op de twee wonden plekken had gelegd: de noodzaak van voldoende geluidverstrooiende elementen in galmkamers en

meer aandacht voor het randeffect. De Bruyn promoveerde in 1967 met een proefschrift over dit laatste onderwerp. De vooraanstaande rol die Kosten speelde in de internationale normcommissies heeft een traditie geschapen voor de Delftse akoestici: ook thans neemt een aantal TPD-medewerkers actief deel aan het werk van ISO/TC 43.

Geluidisolatie, de overdracht van geluid tussen ruimten, is nog steeds een heet hangijzer. Vanouds was reeds vrij veel bekend over de wijze waarop wanden en vloeren reageren als geluidgaten hen treffen, alsmede over de sterkte van het aan de andere zijde afgestraalde geluid. Massa per oppervlak is een belangrijke grootheid, alsmede de voortplantingssnelheid van buiggolven in de constructie. Met spouwconstructies – dus twee wanden achter elkaar – is winst te behalen, mits de luchtlaag ertussen niet te stijf, dus niet te smal is. Maar de overdracht gaat niet alleen via de scheidingswand of -vloer; de gehele bouwconstructie, alle wanden en vloeren in het



Figuur 1. Een meting van de contactgeluidisolatie in woningen anno 1945.

vertrek waar de geluidbron staat, raken in trilling en alle wanden en vloeren in het andere vertrek stralen geluid af. Het bereiken van een zekere geluidsisolatie betekent dus die hele complexe overdracht tot een zekere waarde beperken en niet alleen aandacht geven aan de scheidingsconstructie. 'Delft' ontwikkelde eerst het fysische inzicht in dit complexe gebeuren en vervolgens een rekenmodel voor de computer. Thans kan 'vanaf de tekening' de geluidsisolatie redelijk nauwkeurig worden voorspeld (zolang men volgens de tekening bouwt!).

Zaalakoestiek

Zaalakoestiek is wellicht de bekendste en een van de oudste takken van de geluidboom. Voor concertzalen, schouwburgen, kerken, collegezalen en schoollokalen is de informatieoverdracht van primair belang. Reeds in de oudheid verdiepte men zich in deze overdrachtproblematiek. Oude zalen, zo meent men vaak, hebben van nature een goede akoestiek; daarbij wordt verwezen naar de Griekse openlucht-

theaters en naar oude zalen als het Concertgebouw en de Wiener Musikverein. In het kader van dit artikel past geen grondige analyse hiervan. Maar Delft heeft stellig een belangrijke bijdrage geleverd aan de moderne inzichten op dit terrein. Kostens 'equivalent absorberend oppervlak van publiek + bouwconstructie' is een belangrijk hulpmiddel gebleken bij het akoestisch begeleiden van architecten tijdens de ontwerp- en de bouwphase van concertzalen. Delft kan met voldoening terugzien op projecten als De Doelen in Rotterdam, De Oosterpoort in Groningen en Het Vredenburg in Utrecht. Het gebruik van modeltechnieken is hierbij van grote waarde geweest. Men bouwt een model van de zaal (schaal rond één op tien) en verricht daarin metingen aan nagalmtijd, geluidverdeling en diffusie met geluid, waarvan de frekwentie met de schaalfactor is vergroot. Men kan in het model ook 'model-muziek' afspelen, die opnemen met een 'model-kunsthof' en op normale schaal beluisteren. Zo krijgt men een geluidindruk van de nog-niet-ge-

bouwde zaal. Aangezien echter muziekbeleving in een zaal meer is dan horen alleen, is de waarde van deze luisterproef-in-de-toekomst slechts beperkt.

Geluk

Zaalakoestiek is, vooral als het om concertzalen en dergelijke gaat, veelal een zaak geweest van feeling, ervaring, reputatie en . . . geluk. Weliswaar kon men sommige zaaleigenschappen redelijk kwantitatief voorspellen en beoordelen, zoals de nagalmtijd als functie van de frekwentie (hoewel ook daar een addertje onder het gras zit: niet altijd gedragen wand- en plafondoppervlakken zich conform de verwachting van de akoestisch adviseur), maar andere zaken, die duidelijk belangrijk zijn voor het muzikaal genieten, onttrokken zich aan deze behandeling: de mate van diffusie, de verhouding tussen de sterkten van direct geluid en indirect geluid uit de verschillende richtingen. De reeds genoemde instrumentele ontwikkelingen maken het mogelijk deze grootheden wel te meten, en, voor een zaal in het ontwerp-

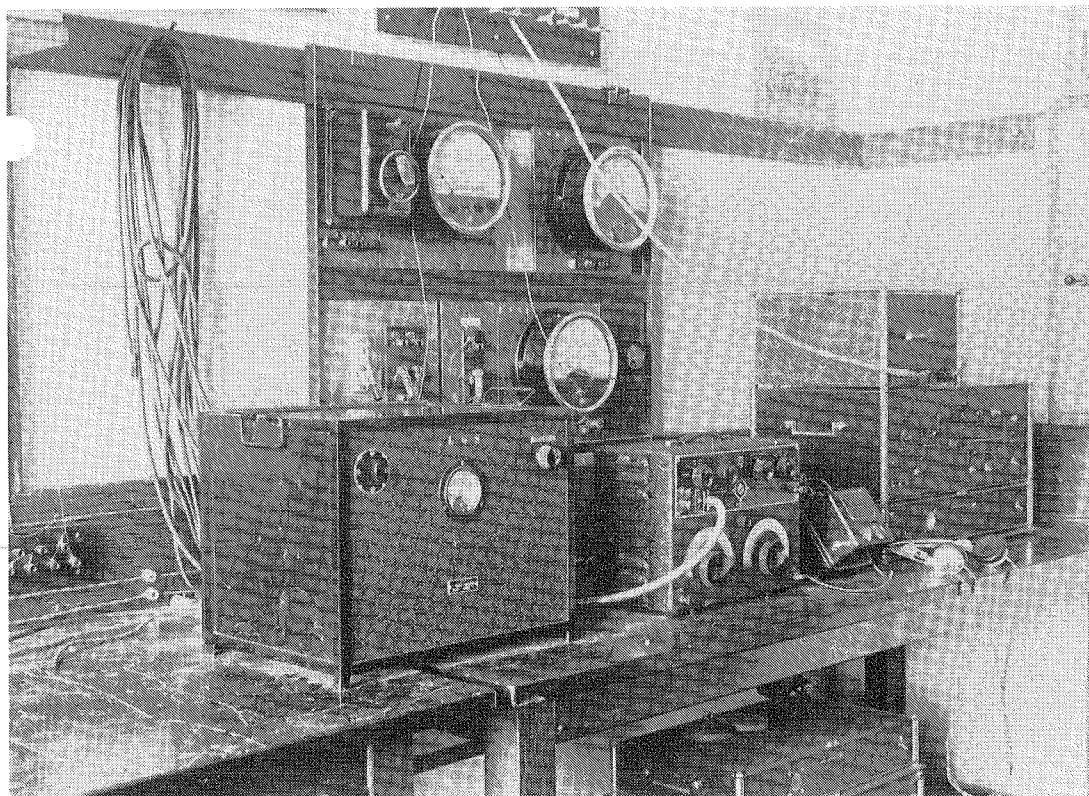
stadium, te voorspellen. Momenteel loopt in Delft een door de industrie ondersteund project, dat als doel heeft het ontwikkelen van een rekenmodel voor de spraakverstaanbaarheid in ruimten. Dit is een vervolg op een door het Instituut voor Zintuigfysiologie TNO (IZF) en TPD gezamenlijk uitgevoerd beleidsruimteproject. De spraakverstaanbaarheid wordt hierbij uitgedrukt in de door de IZF-medewerkers Houtgast en Steeneken ontwikkelde Speech Transmission Index. Samen met de Onderzoeksgroep 'Akoestische Perceptie' van prof. dr. ir. Bilsen kan nu zinvol gezocht worden naar de samenhang van de fysische parameters van het geluidveld in de zaal en de beleving van het geluidbeeld door de luisteraar.

Naar verwachting zal het gebruik van elektronische hulpmiddelen, zoals nagalminstallaties en speciale toesprekinstallaties, sterk toenemen in de zaalakoestiek. Bouwkundige veranderingen zijn immers vaak erg kostbaar en de mogelijkheden om met microprocessor gestuurde akoestische systemen het geluidveld in begrensde ruimten gecontroleerd te verbeteren, worden steeds aantrekkelijker.

Lawaai- en trillingsonderzoek

Geluidbeheersing, of, zo men wil, lawaai bestrijding is vanouds een in Delft intensief bewerkt terrein. Het accent is hier duidelijk in de loop der tijd verschoven:

- oorspronkelijk: de problemen alléén oplossen door isoleren van de geluidbron of van de ontvanger of door een combinatie daarvan;
- daarna: ook gebruik maken van de mogelijkheden van een betere ruimtelijke ordening: indeling van gebouwen, van werkplaatsen, van het ruimtegebruik in het kader van bestemmingsplannen en dergelijke;
- nu: ook aanpakken van de geluidbron zelf, door geluidarm construeren van machines, ge-



Figuur 2. Zo zag in 1945 een meetopstelling voor de bepaling van de nagalmtijd er uit.

luidbewust selecteren van productie- en bewerkingsprocessen, geluidarm installeren en geluidarm gebruiken.

Deze ontwikkeling is sterk gestimuleerd door de toegenomen maatschappelijke waardering voor een gezond woon- en werkmilieu. De Wet geluidhinder en de Arbeidsomstandighedenwet bevatten de spelregels die noodzakelijk zijn om een (door de politiek bepaalde) kwaliteit te handhaven. Delft heeft een belangrijke bijdrage geleverd aan de gedachtenvorming op dit terrein, door specifiek zogenaamd beleidsonderbouwend onderzoek en door het formuleren van meet- en rekenprocedures. Men kon zich daarbij baseren op een ervaring die in de loop van vele jaren was opgebouwd. Recent is een aantal projecten gestart, in samenwerking met de industrie, om bepaalde machines zo te construeren dat zij stiller zijn, een moeilijk probleem dat een multidisciplinaire aanpak vereist.

Scheepsakoestiek

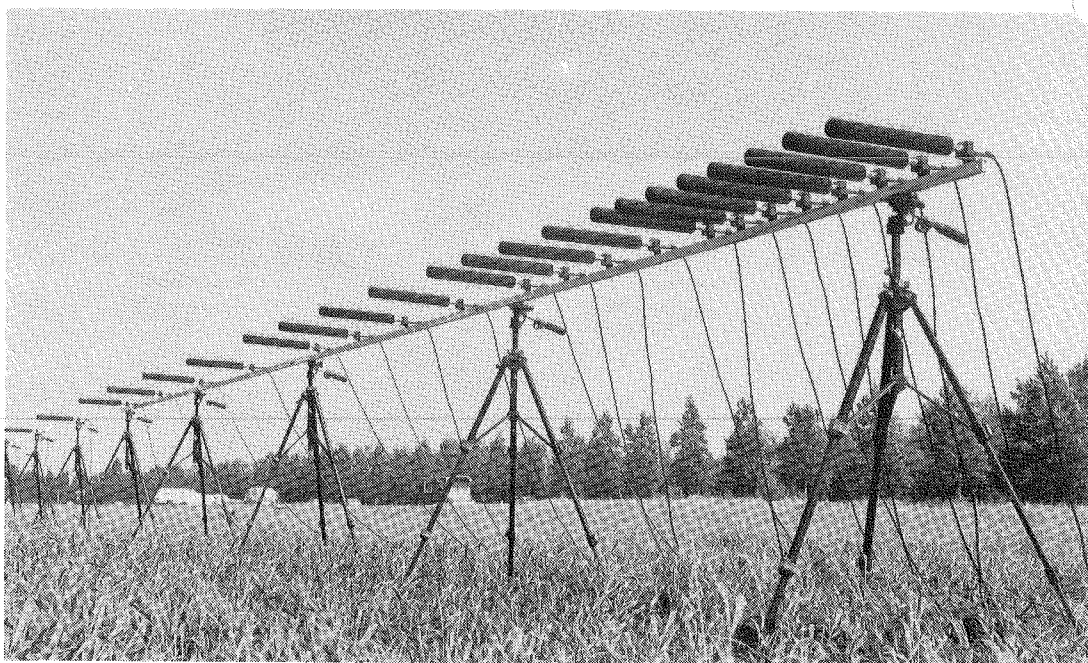
Scheepsakoestiek is (vooral bij de TPD) tot bloei gekomen door de grote behoefte aan inspanningen van de zijde van zowel de Koninklijke Marine als van de Koopvaardij. De redenen hiervoor liggen voor de hand:

- een veilig schip maakt geen overmaat aan geluid onder water, in verband met akoestische mijnen en akoestisch doelzoekende torpedo's;
- een veilig schip heeft een rustige navigatiebrug, waar het efficiënt werken is en men bij slecht zicht de signalen van andere schepen goed kan horen;
- aan boord van een 'stil' schip is het goed vertoeven: men slaapt er goed, converseert er gemakkelijk en loopt geen overmatig risico wat betreft gehoorschade door overmatig geluid.

Nu is het stiller maken van schepen bepaald geen sinecure: geluidgolven planten zich gemakkelijk door de scheepsconstructie voort; er is een sterke afstraling van het geluid onder water. Geluidwerende constructies mogen vooral niet te zwaar zijn: zij

gaan ten koste van de nuttige lading. Voorts moeten zij bestand zijn tegen de grote krachten ten gevolge van de zeegang: men denke aan het verend opstellen van de voortstuwingsmotoren, de dieselmotoren en dergelijke. Vervolgens is er een veelheid van geluid- en trillingbronnen aan boord: de zojuist genoemde motoren, maar ook de schroeven, vele pompen, de ventilatie-inrichting, enz. De maatregelen dienen dus een 'afgewogen pakket' te vormen: niet te veel aandacht voor de ene bron in vergelijking met de andere. En tenslotte: welhaast elke geluidbron wil zijn geluid- en trillingenergie aan de scheepsconstructie kwijt langs een aantal parallelle geluidpaden: de fundatie, maar ook de brandstofleidingen, de omringende lucht, de uitlaatleiding, elektrische leidingen enzovoorts. Ook wat dat betreft is een evenwichtig pakket maatregelen vereist. Maar eerst moet er een bron- en geluidpad-identificatie plaatsvinden. Juist wat dit vraagstuk betreft is en wordt er in Delft baanbrekend onderzoek verricht.

Figuur 3. De Syntakan, een akoestisch antennesysteem. Voorbeeld van een modern meetinstrument.



Eén facet hiervan is de toepassing van het 'reciprociteitsbeginsel', reeds in 1873 door Lord Rayleigh geformuleerd. Het houdt – enigszins vereenvoudigd geformuleerd – in, dat als men in een akoestisch systeem bron en ontvanger van plaats doet wisselen, de overdracht tussen beide punten dezelfde blijft. Gebruikt men nu bij een meting transducenten die zowel geluid kunnen uitzenden als geluid kunnen ontvangen (zoals elektrodynamische luidsprekers die als microfoon gebruikt kunnen worden, of trillingsexcitators die ook trillingsopnemers zijn), dan kan men vaak op zeer efficiënte wijze geluidoverdracht meten. Ten Wolde heeft dit in zijn proefschrift in 1973 nader uitgewerkt. Voor microfoonmetingen en dergelijke paste de TPD de reciprociteit reeds in de jaren vijftig toe. De geluidpadquantificatie is een op zichzelf logisch verlengstuk hiervan; het intrigerende probleem hierbij is dat men in de meeste praktijksituaties de voor de hand liggende oplossing (sluit telkens alle paden op één na af en meet het overblijvende pad door) niet kan gebruiken. Motoren werken nu eenmaal niet als niet alle leidingen aangesloten zijn. Verheij is op dit onderwerp in 1982 gepromoveerd.

De uitwerking van het oude reciprociteitsbeginsel tot een praktisch bruikbaar gereedschap en de techniek van quantificatie van complexe stelsels van geluidspaden vormen nu de ruggegraat van veel akoestisch werk in Delft. Het spreekt welhaast vanzelf dat de eerder beschreven verrijking van de meet- en rekenmogelijkheden een duidelijk stempel heeft gedrukt op het onderzoek: bij alle hiervoor reeds genoemde onderdelen van het werkterrein akoestiek is er sprake van een verdieping van het inzicht in de verschijnselen, dank zij nauwkeuriger en beter meten, sneller en betrouwbaarder rekenen, referentie-data ordelijk voor het grijpen hebben. Dit kan aan enkele sprekende voorbeelden worden toegelicht. Voor de geluidbeheersing kan men nu – zoals gezegd – intensiteiten meten en auto- en kruiscorrelaties bepalen in het laboratorium, maar – zeker zo belangrijk – ook in de praktijk. Dit geeft niet alleen perspectieven voor een veel doelmatiger aanpak van de problemen, maar tevens opent dit de mogelijkheid van onderzoek in tot dusverre hopeloze gevallen. Als voorbeeld diene de situatie van een woongebied in de omgeving van een groot industriecomplex. Men kon aldaar vaststellen

hoe groot de totale geluidsterkte was. Maar identificatie van de belangrijkste geluidbronnen was praktisch onmogelijk. Geluidreductieplannen werden dan ook veelal opgesteld op grond van metingen vlak bij verschillende in aanmerking komende bronnen en een aangenomen geluidoverdracht vanaf die bronnen naar de omgeving. Geen wonder dat daarbij missers werden gemaakt, met alle consequenties van dien. Recent Delfts onderzoek – dat nog zal worden voortgezet – heeft inmiddels klaarheid gebracht in de mechanismen van geluidoverdracht in de (inhomogene) atmosfeer, waar de geluidpaden welhaast steeds gekromd zijn, door wind- en temperatuurgradiënten en waar de bodem een steeds wisselende rol speelt. Wij beschikken nu reeds over rekenprogramma's die een en ander in kaart kunnen brengen.

Daarnaast is een akoestisch antennesysteem 'Syntakan' ontwikkeld, dat uit een 77 meter lang stelsel van 32 microfoons bestaat, gekoppeld aan een geavanceerd minicomputersysteem. Het heeft een frequentiebereik dat de octaafbanden 125, 250, 500 en 1000 Hz omvat (dat is het bij industriegeluid belangrijkste gebied) en een hoekresolutie van 1,5 graad, binnen een totale openingshoek van 60 graden. Met dit systeem kan men in moeilijke praktijksituaties ter plekke de richting van de belangrijkste geluidbronnen en hun bijdragen tot het geluidveld vaststellen, om aan de hand daarvan eventuele maatregelen te treffen. Een kruispeiling kan desgewenst de absolute zekerheid over de plaats van de 'schuldige' geven.

Tenslotte geven ook analyse van trillingswijzen en statistische energiestroom-analyse mogelijkheden tot efficiëntere geluidbeheersing in gebouwen en in constructies. Digitale gegevensverwerking helpt bij het oplossen van netelige problemen als 'hoeveel trillingsenergie loopt er door de wand van deze koelwaterleiding', waarbij het onderbreken van de leiding uiteraard uitgeslo-

ten is. Dit is een verdere uitwerking van de reeds eerder aangeduide technieken van 'geluidpad-identificatie'.

Akoestische echo-technieken

In dit artikel willen wij wat extra aandacht geven aan de ontwikkelingen op het gebied van de echo-akoestiek, een onderwerp dat een bijzondere plaats inneemt bij het onderzoek van de Vakgroep 'Akoestiek' van de Technische Hogeschool Delft en dat in de TPD door een aparte afdeling 'Echo-akoestiek' wordt behandeld.

In echo-akoestische technieken wordt het te onderzoeken medium 'belicht' met geluidgolven: kijken met (veelal onhoorbaar) geluid. De informatie over de mechanische eigenschappen van het medium zit verborgen in het teruggekaatste geluid: de echo's. Het verschil tussen uitgezonden en teruggekaatst signaal wordt bepaald door de voortplanting van de geluidgolven door het medium (gemiddelde snelheid en gemiddelde damping) en door eventuele reflecties, door lokale afwijkingen ten opzichte van de gemiddelde eigenschappen. Het gaat er nu gewoonlijk om die lokale afwijkingen af te beelden: men wil zowel de plaats als de aard van de afwijking vaststellen. De toepassing van dit principe wordt bemoeilijkt door het optreden van ongewenste trillingsvormen en andere storingsbronnen. In vloeistoffen en in gassen hebben wij te maken met slechts één golftype: de longitudinale golf. Maar bij vaste stoffen, waarin schuifkrachten kunnen optreden, komen ook transversale golven voor. Bovendien kunnen aan grensvlakken nog oppervlaktegolven ontstaan.

In de medische echo-diagnostiek spelen alleen longitudinale golven een rol, terwijl men bij seismische echo-technieken de in de bodem optredende transversale golven zo goed mogelijk onderdrukt, door speciale meet- en verwerkingstechnieken. Voor het ultrasoon materiaalonderzoek worden alle bovengenoemde golftypen gebruikt. Oppervlaktegolven spelen voorts een

belangrijke rol bij het detecteren en lokaliseren van oppervlakte-scheuren in constructies.

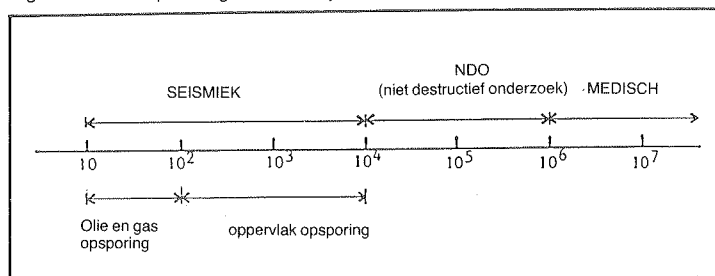
Ook andere storingsbronnen dan ongewenste golftypen kunnen de waarneming bemoeilijken: stoorgeluiden van elders, elektrische ruis, meervoudige echo's. Verbetering van de techniek houdt derhalve in: verbetering van de signaal-stoorverhouding en tevens het optimaliseren van het scheidend vermogen (axiaal en radiaal). Nu is het axiale scheidend vermogen afhankelijk van de pulslengte, terwijl men het laterale scheidend vermogen kan opvoeren door het voorwerp achtereenvolgens onder vele hoeken te belichten. De verbeteringen op de genoemde twee punten (ongewenste golftypen en andere storingsbronnen) zijn mogelijk geworden door een combinatie van moderne signaalverwerking en sterk verbeterde transducenten. Echo-akoestische technieken worden momenteel voor zeer uiteenlopende doeleinden toegepast; de oudste toepassing was in de seismiek, waar men de ligging en de aard van aardlagen, honderden meters onder het oppervlak,

trachtte af te leiden uit de aan het oppervlak ontvangen echo-signalen, na het veroorzaken van explosies. Met moderne rekenmethodieken en betere geofoons is men er echter in geslaagd de kwaliteit van de verkregen gegevens zeer te verbeteren. De geofoonsignalen worden hierbij door onder andere invers filteren gecorrigeerd voor de in de bodem optredende frequentie-afhankelijke damping, rekening houdend met de tijd die de signalen onderweg zijn geweest, dus met de afstand die zij hebben afgelegd. Voorts combineert men de signalen van de geofoons – onder gebruikmaking van meer-kanaalssystemen – op een bijzondere wijze, waardoor op bepaalde diepten telkens gefocusseerd kan worden en het lateraal oplossend vermogen kan worden verbeterd.

Bij de extractie van informatie gaat het uiteindelijk om de vertaling van echo-akoestische gegevens in grootheden die voor de specifieke toepassing van belang zijn:

- bij bodemonderzoek: geologische grootheden
- bij medische toepassingen: weefselparameters

Figuur 4. Frequentiegebieden bij de verschillende toepassingen.



Figuur 5. Akoestische eigenschappen van verschillende media.

grootheid	aardlagen	weefsel	constructie materialen
voortplantingsnelheid	2500 m/s (long.)	1540 m/s (long.)	6000 m/s (long.)
dichtheid	2000 kg/m ³	1000 kg/m ³	7500 kg/m ³
specifieke akoestische impedantie	5 x 10 ⁶ kg/m ² s	1.5 x 10 ⁶ kg/m ² s	45 x 10 ⁶ kg/m ² s
absorptie	.88 dB/λ	.11 dB/λ	.01 dB/λ

– bij materiaalonderzoek: elasticiteitsmodules, compressibiliteit en de aanwezigheid en aard van defecten.

In figuur 4 wordt een globaal overzicht gegeven van de gebruikte frequentiegebieden voor de verschillende toepassingen. Elk frequentiegebied is een compromis tussen scheidend vermogen en indringdiepte: bij een toenemende frequentie-inhoud neemt het scheidend vermogen toe, maar wordt de indringdiepte kleiner ten gevolge van de verhoogde absorptie.

Figuur 5 geeft enkele belangrijke akoestische eigenschappen van verschillende media. Sedimenten vormen meestal een gelaagd medium, weefsels bestaan voornamelijk uit een verzameling puntvormige inhomogeniteiten, materialen kunnen zowel uit reflecterende grenslagen als uit verstrooiende puntinhomogeniteiten bestaan.

Figuur 6 toont een voorbeeld van akoestische onderwaterspectie, een gebied van groeiend belang voor de Nederlandse offshore industrie. De werkomstandigheden offshore zijn zo ongunstig dat intelligente beweegbare meetsystemen (onderwaterrobots) de enige realistische oplossing zijn voor continue inspectie. Verwacht mag worden dat de akoestische groepen van TH en TPD ook hier een belangrijke bijdrage aan de ontwikkelingen zullen blijven leveren.

Akoestische sensoren

In de medische echo-diagnostiek en in het akoestisch materiaalonderzoek maken bronnen en detectoren gebruik van het piezo-elektrisch effect: een elektrische impuls wordt omgezet in een akoestische puls (zenden) en omgekeerd (ontvangen). Bij moderne transducenten voor opname met een hoog scheidend vermogen wordt gebruik gemaakt van een groot aantal kleine elementen die in een rij zijn opgesteld en onafhankelijk als zender en ontvanger kunnen werken. Figuur 7 toont een 271-elementstransducent die recent in Delft door de groep Akoestiek

is gebouwd. De elementen hebben in de langsrichting een breedte van 0,35 mm; ze zijn van elkaar gescheiden door een sneede van ca 0,04 mm. Deze sneden worden aangebracht door een computergestuurd lasersysteem, speciaal voor dit doel gemodificeerd. De micro-elektronica achter de 271 elementen verzorgt de microprocessorgerelateerde elektrische aansturing van elk element en regelt de voorbewerking van de 271 echo-signalen. Het resultaat wordt doorgestuurd naar een speciale processor voor het uiteindelijke inverteringproces. Elk element verlicht een gegeven inhomogeniteit vanuit een bepaalde hoek. Hoe groter het aantal verschillende belichtingshoeken, des te beter het inverteringsschema kan werken. Dit effect wordt bereikt met een groot aantal kleine onafhankelijke elementen die in alle richtingen uitstralen en ontvangen. De materiaalkeuze en dimensionering van een dergelijke sensor beïnvloeden scheidend vermogen en indringdiepte en vormen een interessant technisch-fysisch probleem voor de ontwerper. Binnenkort is gebruik van deze ontwikkeling voor klinische doeleinden te verwachten. Het opmerkelijke verschil in kwaliteit tussen een conventioneel systeem en het Delftse systeem wordt geïllustreerd aan de hand van figuur met opnames van een aantal draden in een waterbassin.

Nog een paar voorbeelden

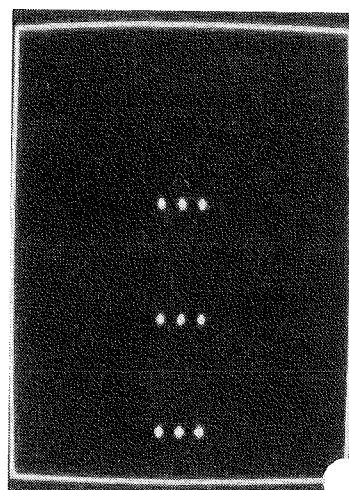
Tenslotte nog drie voorbeelden van verschillende toepassingsgebieden van de echo-akoestiek:

1. Bodemonderzoek

De Dienst Grondwaterverkenning (DGV) van TNO verricht seismisch onderzoek, mede ten behoeve van de steenkoolinventarisatie in Nederland. Er is een nauwe samenwerking tussen de DGV en de groep Akoestiek, vooral op het gebied van de seismische inversietechnieken ('seismische deconvolutie en seismische migratie').

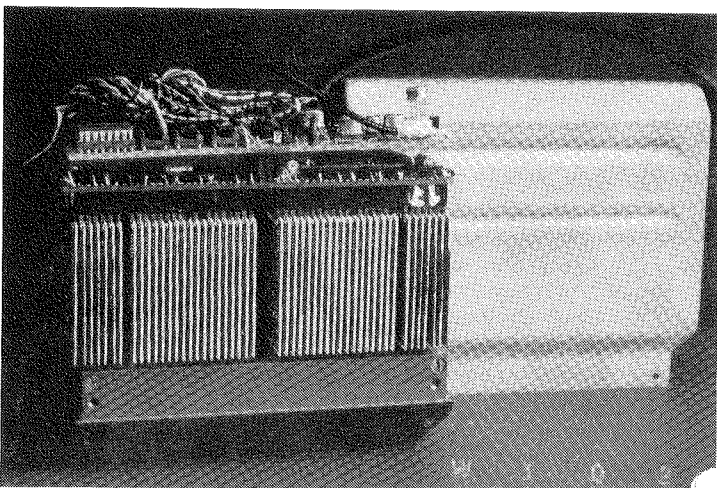


a



b

Figuur 6. Echo-akoestische afbeelding van een aantal draden in een waterbassin (60 dB dynamic range). A. resultaten van een conventioneel systeem; B. resultaten van het Delftse systeem.



Figuur 7. Proto-type van een 271-kanaals transducent zoals recentelijk ontwikkeld door de groep Akoestiek van de TH-Delft.

Figuur 8 laat seismische echo-data zien, opgenomen en verwerkt door de DGV. De verschillende aardlagen zijn duidelijk zichtbaar. Figuur 9 toont het resultaat van het Delftse inversiesysteem; hieruit blijkt de grote verbetering van het scheidend vermogen, vooral in het gebied waar de lagen ten opzichte van elkaar zijn verschoven (de zogenoemde breukzone).

2. Medisch onderzoek

In figuur 10A wordt een medium getoond, dat akoestisch vergelijkbaar is met lichaamsweefsel. Er zijn echo-vrije ruimten opgenomen (vergelijkbaar met cysten) en kleine 'akoestisch-harde'

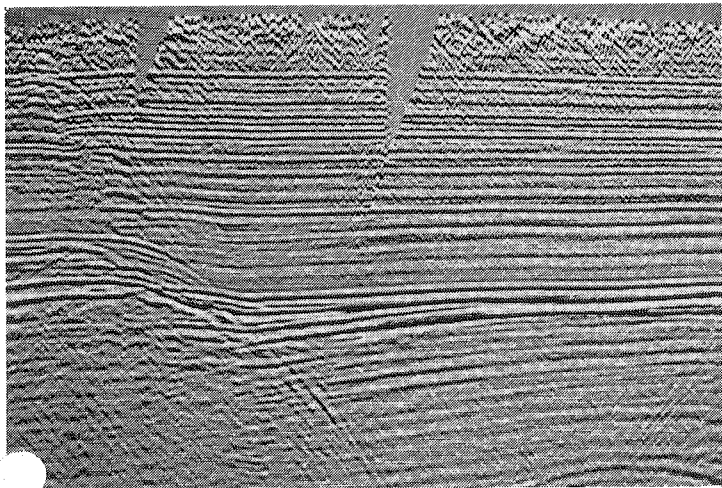
puntinhomogeniteiten. Figuur 10B laat zien dat de verschillende structuren betrouwbaar worden afgebeeld en dat in deze situatie het scheidend vermogen beter is dan 0,5 mm.

3. Akoestisch materiaalonderzoek

De echo-akoestische afdeling van de TPD en de vakgroep Akoestiek doen onderzoeken voor onderwaterapplicaties en voor niet-destructief materiaal. Figuur 11 toont een voorbeeld hoe in principe scheurdetectie kan plaatsvinden.

Samen met anderen

Akoestiek geeft vaak – net als andere onderdelen van de na-



Figuur 8. Seismische echo-data, opgenomen en verwerkt door de Dienst Grondwaterverkenning TNO.

tuurkunde – een noodzakelijke maar niet voldoende basis voor het oplossen van een probleem. Kennis van andere disciplines is dan vereist, en het is vaak niet praktisch om al die kennis in eigen huis te halen. Samenwerking met anderen is beter; zo profiteren de Delftse akoestici niet alleen van de steun die anderen binnen TPD en Technische Natuurkunde kunnen geven, maar ook van de andere TNO-instituten en andere instellingen voor wetenschappelijk onderwijs. Enkele voorbeelden zijn:

- het onderzoek naar de samenhang tussen geluidsterkte en gehoorshinder, met de psychologen van het IMG. (Instituut voor Milieuhygiëne en Gezondheidstechniek TNO)
- spraakverstaanbaarheidsonderzoek met de zintuigfysiologen van het reeds eerdergenoemde IZF (Instituut voor Zintuigfysiologie TNO)
- onderzoek naar milieuvriendelijk rijgedrag, met de voertuigexperts van het IW (Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO) en het IZF.

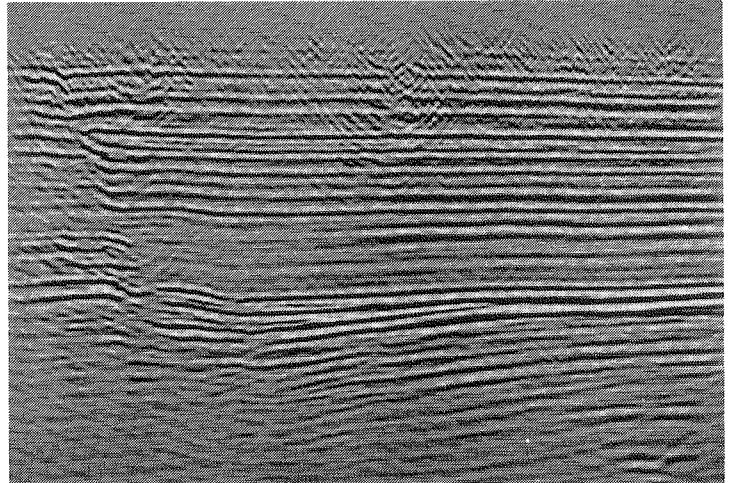
Soms is de samenwerking zo innig dat er een samenwerkingsverband kan ontstaan; de TPD heeft dat nu op het terrein van de bouw fysica met de vakgroep 'Fysische Aspecten van de Gebouwde Omgeving' (FAGO), Afdeling Bouwkunde van de TH-Eindhoven. De FAGO doet het bouwakoestisch onderzoek van-

uit de bouwkundige invalshoek, Delft op basis van de fysica: zo zijn zij samen sterk. Samenwerking in projecten met anderen wordt evenmin geschuwd, bijvoorbeeld met akoestische of stedenbouwkundige adviesbureaus.

Nog geen einde aan de ontwikkeling

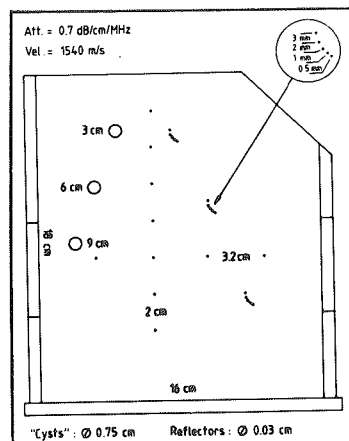
Dit alles overziende kunnen wij de toekomst van het akoestisch onderzoek in Delft vol vertrouwen tegemoet zien: de essentiële rol die het geluid in de menselijke samenleving speelt – een sterk argument om onnodig en storend geluid te weren –; de nog lang niet uitgeputte mogelijkheden geluidgolven te gebruiken als hulpmiddel bij onderzoek, maar ook als informatiedrager omtrent de 'gezondheid' van de geluidbron (condition monitoring), dit alles blijft een uitdaging voor de student-van-het-geluid, wat elke akoesticus toch is.

Dankbaarheid past ons voorts voor de Delftenaren van het eerste uur, die het fundament voor onze werkgemeenschap hebben gelegd – zij zijn hierboven reeds genoemd. Twee namen bleven echter nog onvermeld: ir. H. Alting, de eerste directeur van de TPD, en ir. H. de Zeeuw, zijn opvolger, die als eerste akoestici de TPD kwamen versterken en daarna het geluid immer een wil-
ligoorgaven.

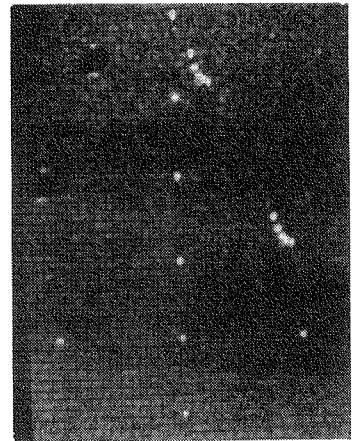


Figuur 9. Resultaat van het Delftse inversie-systeem.

Figuur 10. Echo-akoestische afbeelding van een medische georiënteerd medium.



A. Schematische weergave van het medium.



B. Echo-akoestische afbeelding.

Figuur 11. Schematische voorstelling van belangrijkste type golven bij scheurdetectie.

