

NEDERLANDS AKOESTISCH GENOOTSCHAP

NIET-DESTRUCTIEF MATERIAALONDERZOEK D.M.V. ULTRASONE TECHNIEKEN

Ir. J.A. Vogel - Ir. K. Verhulst - R. Breeuwer

Technisch Fysische Dienst TNO-TH, Delft

ULTRASOUND TECHNIQUES IN NON-DESTRUCTIVE TESTING

Summary: Increasing use of ultrasound techniques in non-destructive testing of materials is furthered by technical, economic and safety aspects. Presently, these ultrasound techniques are rather complex; this is caused by transmission as well as scatter properties of the materials.

Ultrasound registrations are normally based on single element techniques and the results are far from objective as well as strongly dependent on the capabilities of the operator.

Better insight in transmission and scatter properties of materials as well as the availability of techniques for improvement of resolution, bandwidth and visualisation will result in significant improvement of the non-destructive testing of materials.

Physical aspects will be discussed and new techniques in transducer-technology, multi-channel processing and TV-imaging will be presented as employed in a practical imaging experiment.

1. Inleiding

Zowel bij de fabricage van produkten als bij de controle van in gebruik zijnde systemen wordt gebruikgemaakt van niet-destructief materiaalonderzoek (NDO).

Het NDO vindt plaats ten einde de kwaliteit van een object te kunnen vaststellen. Deze beoordeling kan gebaseerd zijn op economische gronden en veiligheidsmotieven.

Enkele voorbeelden hiervan zijn:

- Een fabrikant, die een basisprodukt levert, wil een lijmverbinding testen, ten einde grote schadeclaims te voorkomen. Deze claims kunnen ontstaan indien het eindprodukt, dat via verdere verwerkingen een sterk verhoogde meerwaarde heeft, niet voldoet.
- Het uitvallen van een bepaalde component in een industrieel complex vormt een direkt gevaar voor het omringende leefmilieu. Deze component wordt een zgn. kritische component genoemd. Bijzondere produktiecontrole en bewaking tijdens bedrijf zijn vereist.

Het NDO is in het algemeen van belang voor de volgende partijen:

- producent
- overheid
- afnemer
- verzekeringsmaatschappij

Het NDO kan plaatsvinden met een groot aantal technieken. Allereerst is de visuele inspectie van belang, waarbij endoscopie en fluorescentie belangrijke terreinen zijn. Naast de visuele inspectie worden ondermeer toegepast:

- radiografie
- ultrasone inspectie
- wervelstroom
- neutrografie
- thermografie

De belangrijkste technieken voor inwendige inspectie van materialen zijn de radiografische en de ultrasone technieken.

De ultrasone techniek is in principe geschikt voor het reflecteren en lokaliseren van materiaalafwijkingen die belangrijk kunnen zijn voor de integriteit van constructies.

De voortplantingseigenschappen van ultrasone golven in materialen zijn echter vaak van complexe aard, waardoor bij de interpretatie foutdetectie en foutlokalisatie problematisch kan zijn.

Deze interpretatie is in sterke mate afhankelijk van de ervaring en kwaliteit van de inspecteur, zodat het inspectieresultaat niet voldoende eenduidig kan worden vastgelegd.

In dit artikel wordt ingegaan op de complexiteit van ultrasone metingen in materialen, waarna ontwikkelingen worden geschetst die er toe moeten leiden dat het ultrasone materiaalonderzoek fundamenteel verbetert betreffende de karakterisering van afwijkingen en éénduidige afbeelding van de meetresultaten.

2. Ultrasone inspectieproblematiek

In dit hoofdstuk zal ingegaan worden op een viertal verschijnselen die kenmerkend zijn voor de problematiek van de ultrasone inspectie in materialen. Deze onderwerpen zijn: het optreden van diverse golftypen, brekingsverschijnselen bij overgangen tussen media, verstrooiing door de inwendige materiaalstructuur en anisotropie, d.w.z. richtingsafhankelijkheid voor ultrageluid.

2a. Golftypen

In vloeistoffen en gassen behoeft slechts rekening gehouden te worden met één golftype, de longitudinale golf. Een schematische voorstelling van de golfvoortplanting in dit golftype is weergegeven in fig. 1. In een vaste stof kunnen echter ook schuifkrachten optreden. In vaste materialen kunnen daarom ook schuifgolven (transversale golven) aanwezig zijn. In tegenstelling tot de longitudinale golven is hier de richting van de deeltjesbeweging

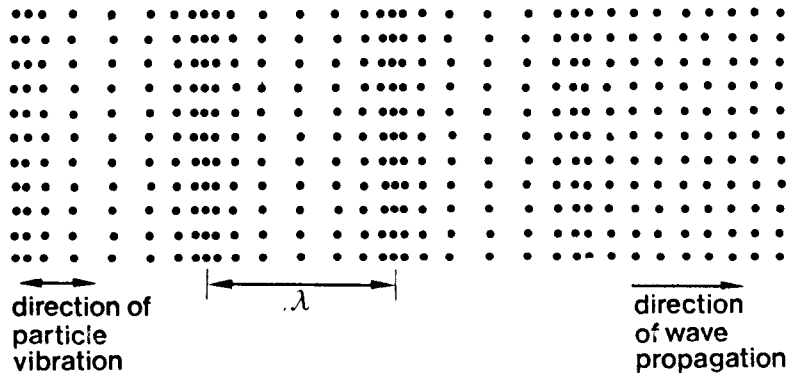


Fig. 1. Voortplanting van longitudinale golven

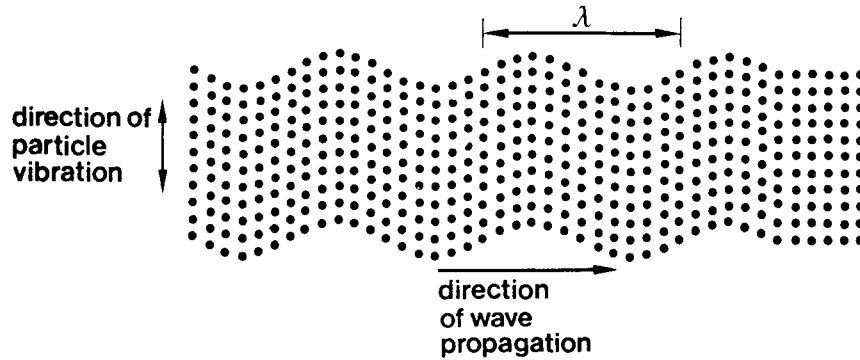


Fig. 2. Voortplanting van transversale golven

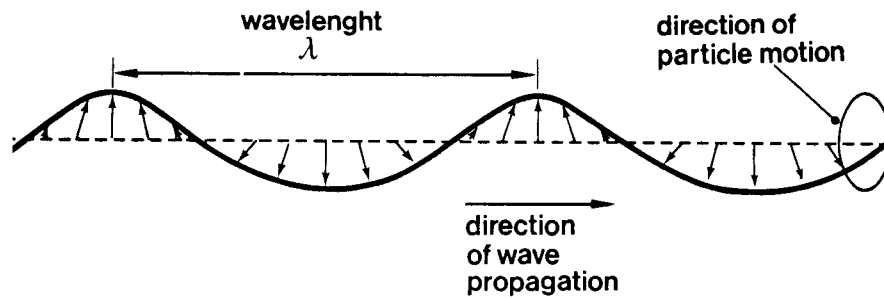


Fig. 3. Voortplanting van oppervlakte golven

loodrecht op de richting van de golfvoortplanting (fig. 2).

Aan de begrenzingen van een materiaal kunnen hiernaast oppervlaktegolven ontstaan, die als een mengvorm tussen longitudinale en transversale golfvoortplanting gezien kunnen worden.

Een illustratie van deze complexe golfvoortplanting is weergegeven in fig. 3.

Indien het medium bovendien in één of meerdere richtingen een beperkte afmeting heeft t.o.v. de golflengte kunnen diverse andere golfvormen optreden, zoals plaatgolven (lamb waves) en staafgolven (rod waves). Een meer uitgebreide beschrijving van deze golftypen wordt gegeven door J. Szilard [1].

Ieder van deze golven heeft een eigen voortplantingssnelheid voor ultrageluid.

Voor de geluidssnelheid van een longitudinale of kompressiegolf geldt:

$$c_{\text{kompressie}}^2 = E / \rho$$

waarin E = elasticiteitsmodulus of bulkmodulus (N/m^2)

G = glijdings - of schuifmodulus (N/m^2)

ρ = soortelijke massa (kg/m^3)

verder geldt:

$$c_{\text{schuif}}^2 = G / \rho$$

$$c_{\text{oppervlak}}^2 \approx 0.9 G / \rho$$

In veel materialen geldt bij benadering dat de snelheid voor de kompressiegolf tweemaal zo hoog is als de snelheid voor de schuifgolf. De snelheid in platen en staven is sterk afhankelijk van de afmetingen, in golflengten gemeten, van deze structuren.

De lage geluidssnelheid voor schuifgolven maakt dit golftype in principe aantrekkelijk voor inspectietaken, immers een lage snelheid resulteert in een kleine golflengte en dus een grote resolutie.

Bij inspectie moet er rekening mee worden gehouden dat iedere inhomogeniteit, materiaalbegrenzing of hoekstructuur verantwoordelijk kan zijn voor de golfconversies.

Een fraaie illustratie van deze golfconversie wordt gegeven door K.G. Hall [2], die een stroboscopische foto-elastische techniek gebruikt, zoals weergegeven in fig. 4.

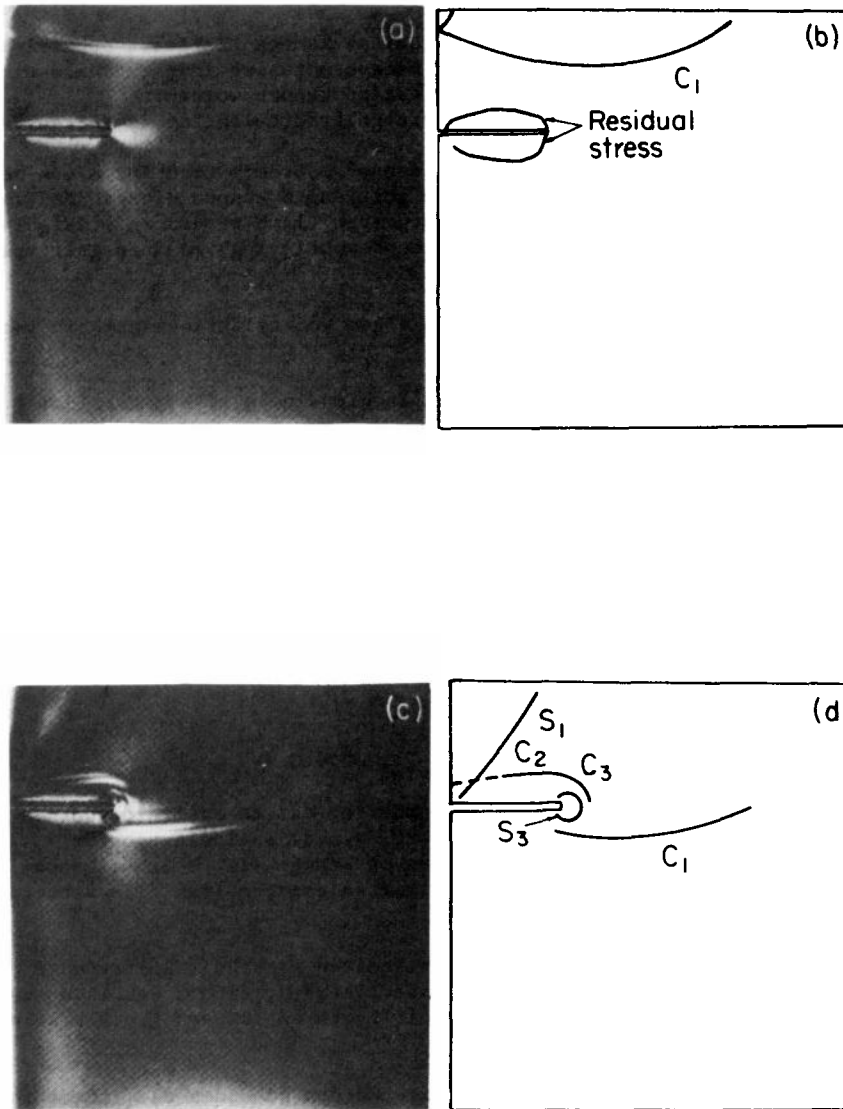
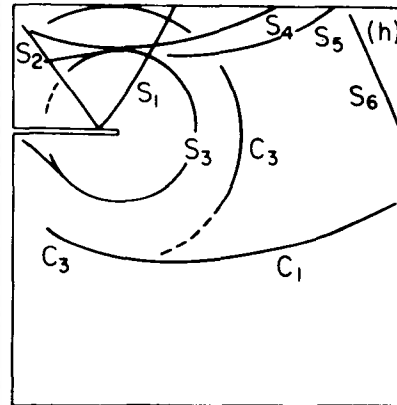
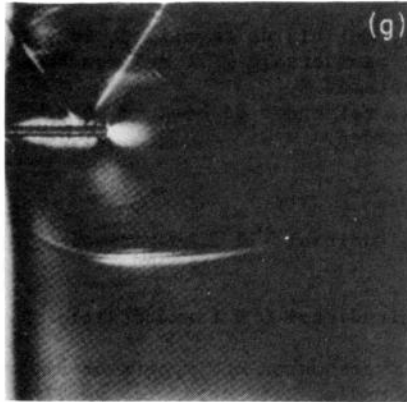
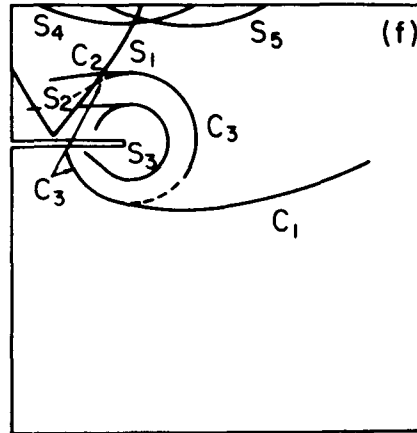
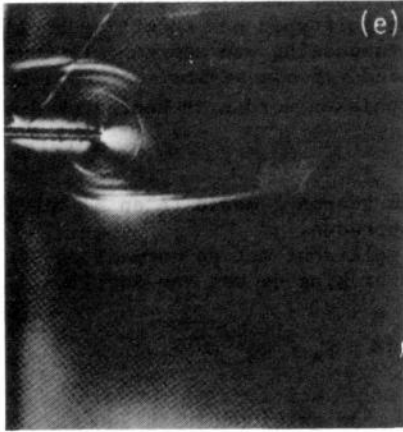


Fig. 4. Een serie afbeeldingen van een diffractieexperiment



- C = longitudinale golf, S = transversale golf
 C₁ = invallende longitudinale golf
 S₁ = transversale golf veroorzaakt door reflectie van C₁ aan het oppervlak
 C₂ - reflectie van C₁ aan de spleet
 C₃ - gediffracteerde longitudinale golf
 S₂ - transversale golf veroorzaakt door reflectie van C₁ aan de spleet
 S₃ - gediffracteerde transversale golf
 S₄, S₅, S₆ - transversale golven veroorzaakt door golfconversie aan het oppervlak

De aanwezigheid van de diverse golftypen bemoeilijkt de interpretatie, echter het feit dat deze golftypen een onderling afwijkende snelheid hebben, biedt bij toepassing van meerkanaalstechnieken de mogelijkheid om de invloed van ongewenste golftypen te onderdrukken. Deze meerkanaalstechnieken worden in hoofdstuk 3 besproken.

2b. Breking

Indien een golffront het grensvlak tussen 2 media (A en B) bereikt kan naast reflectie ook breking optreden.

Indien de hoek van inval van het golffront met de normaal op het grensvlak α is, dan geldt voor de breking de wet van Snellius:

$$\sin \alpha / \sin \beta = c_A / c_B$$

waarin β de hoek na breking is en c de geluidssnelheid in het medium voorstelt.

Indien medium B een vaste stof is, zal bij de invallende longitudinale golf uit medium A ook een transversale golf met een hoek γ t.o.v. de normaal in medium B ontstaan.

Indien medium A een vaste stof is, zal onder de hoek $-\delta$ een transversale golf gereflecteerd worden.

Voor deze situaties geldt:

$$\sin \alpha / \sin \gamma = c_{A \text{ longitudinaal}} / c_{B \text{ transversaal}}$$

$$\sin \alpha / \sin \delta = c_{A \text{ longitudinaal}} / c_{B \text{ transversaal}}$$

Hiernaast kunnen bij specifieke invalshoeken ook oppervlaktegolven ontstaan aan het grensvlak van de media. Deze oppervlaktegolven worden hier buiten beschouwing gelaten.

Een illustratie van de beschreven brekingseffekten wordt gegeven in fig. 5.

Een nuttig gebruik van de brekingseffekten wordt verkregen door gebruikmaking van zgn. wigtransducenten (fig. 6).

De toepassing van een wig maakt het mogelijk om materialen onder specifieke hoeken in te treden, bovendien wordt onder bepaalde hoeken gerealiseerd dat alleen een transversale golf het materiaal intreedt.

Deze wig is gewoonlijk van perspex gemaakt dat een sterk afwijkende geluidssnelheid heeft t.o.v. te inspecteren metaalstructuren.

Een probleem bij gebruik van wiggen, dat de aandacht behoeft, is de lage efficiency van wigtransducenten.

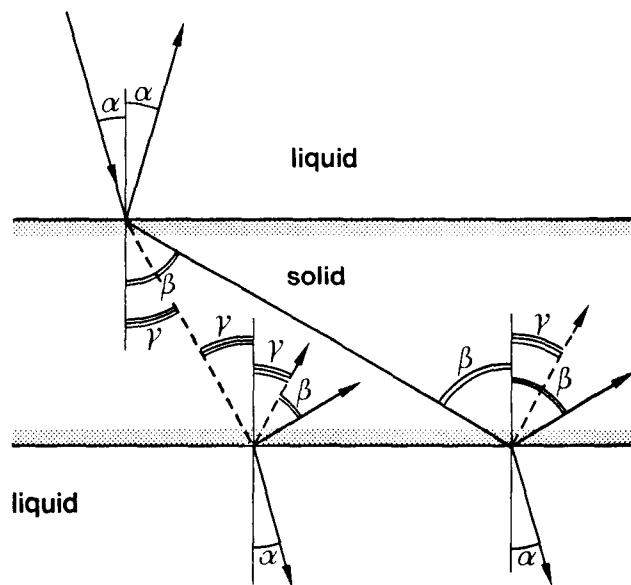


Fig. 5. Brekingsverschijnselen bij de overgangen tussen vaste stof en vloeistof

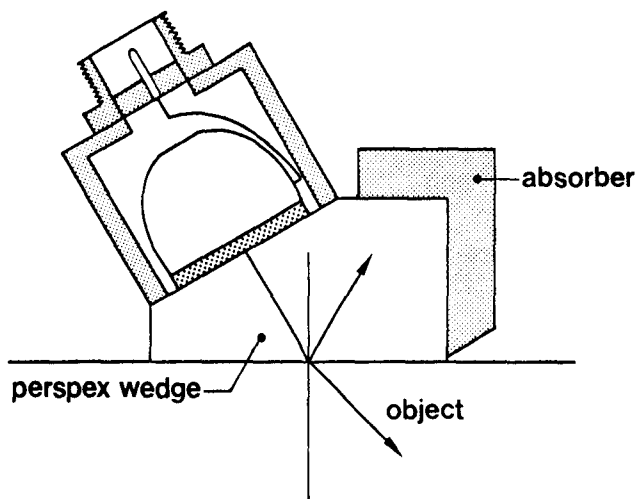


Fig. 6. Wigtransducent

Ontwikkeling van kunststofpiezomaterialen binnen TNO en ideeën voor nieuwe wigstructuren [3] bieden mogelijkheden tot verhoging van de efficiency.

2c. Verstrooiing

De meeste materialen die geïnspecteerd moeten worden, zijn niet homogeen, maar hebben een bepaalde structuur. Materialen met een bijzonder grofkorrelige structuur zijn lasnaden en beton.

De inhomogeniteit van het materiaal veroorzaakt verstrooiing van de ultrasonische golven in het materiaal. De mate van verstrooiing is afhankelijk van de afmeting van de inhomogeniteiten ten opzichte van de golflengte van het signaal en van de impedantie-sprongen die veroorzaakt worden door de verschillen in voortplantingssnelheid.

Het verstrooide geluid verdwijnt voor een groot deel in het materiaal, maar verschijnt voor een deel als stoorsignaal ook weer op de ontvangende transducent. De amplitude van dit ontvangen verstrooide geluid (A_S) hangt af van het aantal reflectoren dat op hetzelfde moment bijdraagt aan het signaal op de transducent. Bij pulsvormige zendsignalen is naast de verstrooiingscoëfficiënt de pulslengte bepalend voor de amplitude van het verstrooide geluid. Omdat de amplitude van reflecties (A_R) van defecten niet bepaald wordt door de pulslengte, zolang de pulsen zo kort gekozen worden dat deze gescheiden waargenomen worden, is de signaal-stoorverhouding SNR afhankelijk van de pulslengte Δ en de verstrooiingscoëfficiënt α_S . Het signaal wordt naast verstrooiing ook door absorptie verzwakt. De absorptiecoëfficiënt is α_A . Indien $SNR = A_S(x) / A_R(x)$ geldt

$$SNR = \frac{1}{\sqrt{\alpha_S \Delta}}$$

Dus een grotere pulslengte betekent een lagere signaal-stoorverhouding. De verstrooiingscoëfficiënt α_S neemt toe met de frequentie. Dit betekent een toenemende verzwakking en een afnemende signaal-stoorverhouding. Dit gaat gepaard met sterkere reflecties tegen de inhomogeniteiten waardoor ook meervoudige reflecties kunnen optreden.

Dit speelt vooral een rol in de nabijheid van de zendtransducent, hetgeen betekent dat met een gescheiden zender en ontvanger (bv. SEL* techniek) een mogelijk grotere signaal-stoorverhouding verkregen wordt dan met een puls-echo techniek.

In het algemeen dienen pulsen zo kort mogelijk te zijn en is een twee-transducent methode in het voordeel ten opzichte van een één-transducent methode.

*(Send Empfänger Longitudinal)

Een materiaal met zeer sterk verstrooiende eigenschappen is beton.

In beton zijn de enkelvoudig en meervoudig verstrooide signalen zo groot dat in de puls-echo techniek veelal geen reflecties van begrenzingen van de betonstructuur herkend worden in het ontvangen stoorsignaal.

Verbetering van de signaal-stoorverhouding kan bereikt worden door verkleining van het verstrooiende volume.

Dit volume kan verkleind worden door vergroting van de laterale resolutie door toepassing van meer-kanaalstechnieken of door vergroting van de axiale resolutie.

De axiale resolutie wordt verbeterd door toepassing van breedbandige transducenten.

Voor een gegeven transducent kan de axiale resolutie echter ook verbeterd worden door inverse filtertechnieken. (Verhulst [4])

Voor inverse filtering zijn nu twee technieken ter beschikking, nl. filtering vooraf in het zendsignaal of achteraf na ontvangst van het signaal.

Indien inverse filtering vooraf wordt uitgevoerd, wordt na bepaling van de systeem impulsrespons een optimaal ingangssignaal berekend.

Dit ingangssignaal wordt in een digitaal geheugen opgeslagen en periodiek uitgelezen met een snelle D/A omzetter. De bandbreedte van de signalen kan op deze wijze aanzienlijk vergroot worden. Het ingangssignaal kan in PROM opgeslagen worden, waardoor in de praktijk met een vrij eenvoudige instrumentatie set-up kan worden volstaan.

Invers filtering achteraf wordt uitgevoerd in een computer na digitalisatie van het ontvangen signaal.

Deze techniek is flexibel en biedt mogelijkheden om een inverse operator te ontwerpen, die op optimale wijze voor de stoor-signalen compenseert.

Naast vergroting van resolutie en signaal-stoorverhouding is het inverse filter van groot belang bij periodieke inspecties. Doordat de eigenschappen van de meetketen en vooral de transducenten door het inverse filter sterk worden onderdrukt is vergelijking van inspectie-resultaten mogelijk zonder dat deze beïnvloed zijn door veroudering van de transducent toepassing van andere elementen in de meetketen.

2d. Anisotropie

Materialen, waarvan de akoestische eigenschappen afhangen van de oriëntatie t.o.v. een invallend golffront zijn uiteraard moeilijk te inspecteren.

Helaas moet geconstateerd worden dat juist lasmaterialen, die zeer zeker inspectie vereisen, in sterke mate anisotroop kunnen zijn.

De anisotropie vindt zijn oorzaak in het thermische proces na het leggen van de lasrupsen waardoor een voorkeursrichting voor de groei van kristallen ontstaat.

Afhankelijk van de oriëntatie is sprake van grote verschillen in demping (bv. 12 dB) en snelheid (b.v. 20%)

Inspectie van lasnaden met anisotropie is daarom een specialistische activiteit, die slechts mogelijk is met inzicht in de oriëntatie van de lasnaad en de bijkomende ultrasone interactie.

Voor eenduidige en eenvoudige inspecteerbaarheid van lasnaden is het daarom gewenst om naar lastechnieken te zoeken, die een minimale anisotropie opleveren.

3. Digitale verwerkingstechnieken voor NDO

3a. Probleemstelling

De technische problemen die zich voordoen in de ultrasone diagnostiek van materialen kunnen als volgt worden samengevat:

1. Scheidend vermogen (axiaal en lateraal)
2. Signaal/stoorverhouding (achtergrondruis, brongebonden ruis en onderzoeksmedium gebonden stoorsignalen).
3. Differentiatie tussen de responsies van de verschillende golf-typen.
4. Informatieverwerking en -presentatie.

Het axiaal scheidend vermogen wordt bepaald door de pulslenkte van het bronsignaal en de akoestische eigenschappen van het te onderzoeken materiaal. Deconvolutie-technieken kunnen dit axiaal scheidend vermogen aanzienlijk verbeteren [5]. Limiet hierbij blijkt de minimale signaal/stoorverhouding te zijn. Gebleken is dat de bandbreedte van de ultrasone meetketen hierbij een dominante rol speelt.

Het lateraal scheidend vermogen wordt bepaald door de richtingsafhankelijke eigenschappen van het zend- en ontvangsysteem.

Focusserende technieken verbeteren het lateraal scheidend vermogen. Optimale resultaten kunnen behaald worden indien gebruik gemaakt wordt van een kwantitatieve beschrijving van de voortplanting van geluid, waarbij de bundelvorming op synthetische wijze wordt gerealiseerd.

Essentieel hierbij is het gebruik van meerdere zenders en ontvangers.

Ten aanzien van achtergrondruis en brongebondenruis kan in geavanceerde systemen de signaal-stoorverhouding vergroot worden door een optimale instelling van temporale en spatiële bandbreedte enerzijds en door het toepassen van deconvolutie- en focuserings-technieken anderzijds.

Bij onderzoeksmidde-gebonden stoorsignalen (zoals die voorkomen in bijvoorbeeld grofkorrelige giet- en lasstructuren van materialen met anisotrope akoestische eigenschappen) kan naast de reeds genoemde methoden een vergroting van de signaal-stoorverhouding gerealiseerd worden door geschikt gekozen correlatie- en/of middelingstechnieken.

In de praktijk treden veelal meerdere golftypen naast elkaar op. Dit kan aanleiding geven tot ernstige interpretatie problemen. Met meer-kanaals technieken is een betere differentiatie tussen de verschillende golftypen mogelijk.

3.2 Verwerkingstechnieken gebaseerd op golffrontextrapolatie

De eerste stap in het verkrijgen van informatie over positie en de aard van defecten in een te inspecteren medium is het verrichten van fysieke metingen aan de oppervlakte van het medium. Deze fysieke metingen bestaan uit het registreren van geluid-echo's, die zijn ontstaan aan akoestische grensvlakken (reflecties) en inhomogeniteiten (diffracties) binnen het project. Figuur 7 geeft een schematische voorstelling van een echo-akoestisch systeem.

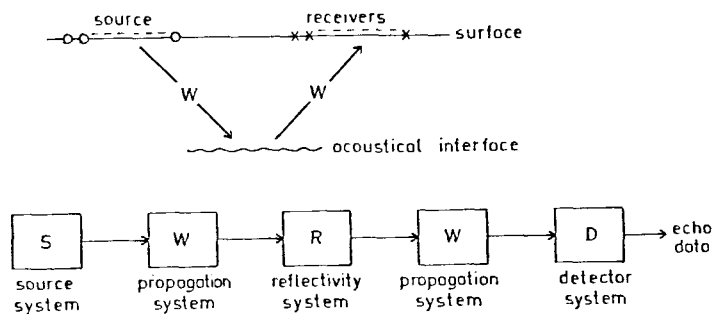


Fig. 7: Schematische voorstelling van een echo-akoestisch systeem

Een uitgebreide beschrijving van dit systeem wordt gegeven door Berkhout [6].

Het bronsysteem S stuurt akoestische energie in pulsvorm het medium in.

De veranderingen van de puls (amplitude en fase) tijdens de propagatie in het medium worden bepaald door het propagatie-systeem W. De eigenschappen van W kunnen worden afgeleid uit de golfvergelijking voor akoestische golven. De akoestische grensvlakken en inhomogeniteiten in het medium, waar een gedeelte van de akoestische energie wordt teruggekaatst, worden gedefinieerd door het verstrooiingssysteem R. Indien men echo-akoestische data wil simuleren dan moet R worden gespecificeerd. In de echo-akoestiek moet R uit de gemeten echo's worden bepaald.

Het propagatiesysteem W bepaalt ook de propagatie-eigenschappen van de gereflecteerde pulsen naar het oppervlak. In het totale circuit komt W dus twee maal voor.

Het detectie-systeem D registreert de teruggekaatste pulsen aan het oppervlak van het object.

De primaire doelstelling van een echo-akoestisch systeem is het zo goed mogelijk schatten van het verstrooiingssysteem R.

Een wiskundige behandeling van deze techniek die gebaseerd is op golffrontextrapolatie is gegeven door Ridder [7].

Deze techniek met meer-kanaalsverwerking is reeds met succes toegepast in de geofysica en in het medische ultrageluid.

Ter demonstratie van de kracht van deze techniek in NDO is een voor ultrageluid zeer moeilijk te inspecteren materiaal gekozen: beton.

De grove kiezelstructuur in betonmateriaal geeft aanleiding tot meervoudige verstrooiingsverschijnselen, die het voor praktisch iedere ultrageluid techniek onmogelijk maakt om een voldoende signaal-stoorverhouding te verkrijgen.

Slechts een tweetal eenvoudige inspectietechnieken voor beton vinden een bredere toepassing, nl. de snelheidsbepaling d.m.v. transmissie en de breukbepaling in betonnen heipalen.

In de benadering voor de nieuwe afbeeldingstechniek is gekozen voor de volgende uitgangspunten:

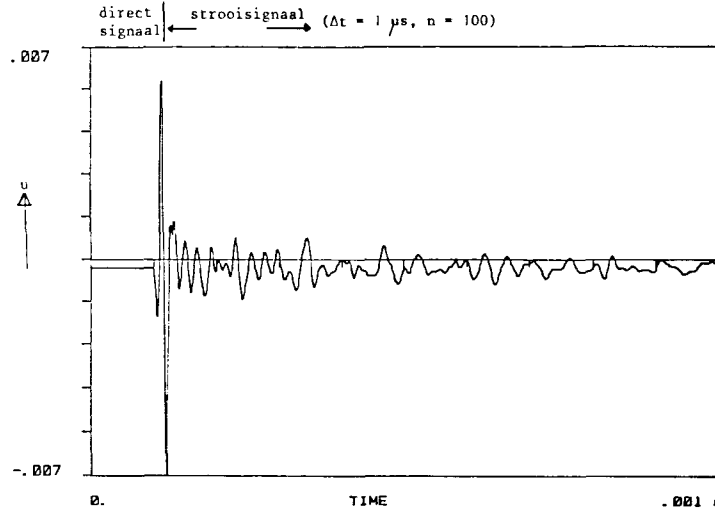
1. Ontwikkel een breedbandige bron en ontvanger
2. Digitaliseer de metingen een aantal opvolgende meetposities op het betonoppervlak
3. Pas de focusseringsoperatie volgens de genoemde golffrontextrapolatie toe.

Als bron/ontvanger voor broninspectie zijn 100 kHz transducenten ontwikkeld, die door toepassing van nieuwe piezo-materialen, matching en stacking technieken goede akoestische en elektrische karakteristieken hebben.

Fig. 8 geeft een karakteristieke puls van deze transducent bij metingen in beton weer.

Na een aantal succesvolle experimenten t.b.v. de bepaling van diktes en begrenzingen van betonstructuren, is een testobject gemaakt waarin een gat van ± 5 cm doorsnede is geboord.

Een schematische doorsnede van het betonblok met de boring is weergegeven in fig. 9



Figuur 8 : Voorbeeld van een ontvangsignaal bij metingen in beton

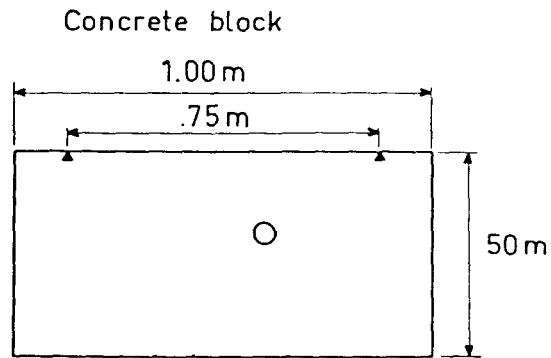
De metingen op het betonblok zijn met een zend/ontvangst paar als een lineaire scan over 40 cm verwerkt. Hierbij zijn 32 afzonderlijke meetposities op onderling equidistante afstand te onderscheiden.

De focusseringssoftware heeft een 2-dimensionale doorsnede voor de aangegeven 75 cm op het blok berekend. (zie figuur 10)

Op de afbeelding is het gat duidelijk te zien. Ook de bodem van het object is te zien, met een schaduwwerking van het gat. De meting resulteert in het ontstaan van een oppervlaktegolf die zich als een horizontale lijn boven het gat afbeeldt.

Verder zijn in de afbeelding residuen van scatter-echo's waar te nemen en diffractiekrommen, die veroorzaakt worden door de begrenzingen van het blok.

Met behulp van het experiment is aangetoond dat zelfs in zeer



holes: ϕ 50 mm $c=4800$ m/s
 $f = .15 - 150$ kHz

Fig. 9. Betonblok met boring

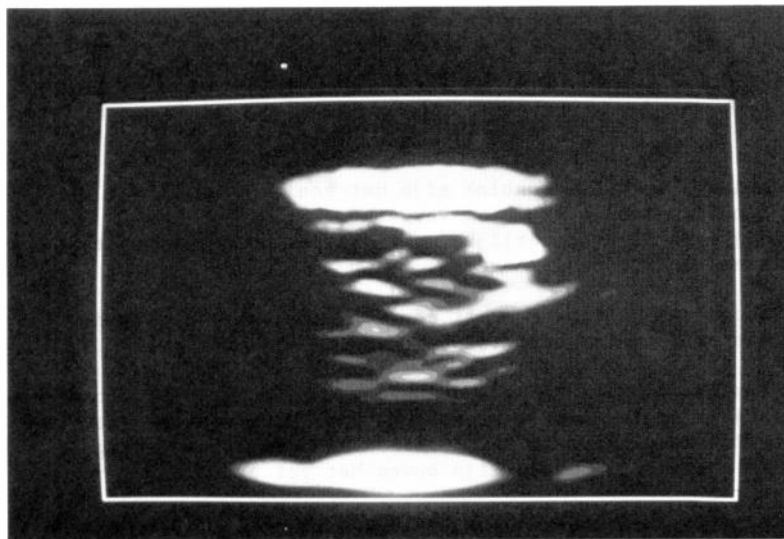


Fig. 10. Echo-akoestische afbeelding van een betonblok. Teneinde het residu van de scatter echo's te tonen, zijn ook de lage signaal-amplitudes afgebeeld.

moeilijk te inspecteren materialen nauwkeurige afbeeldingen mogelijk zijn en objectieve inspectieresultaten kunnen worden vastgelegd.

Verdere ontwikkelingen op dit terrein dienen bij voorkeur gepaard te gaan met de ontwikkeling van constructietechnieken, die een inspecteerbaar produkt opleveren.

4. Samenvatting

In dit artikel is ingegaan op de problematiek die de ultrasone techniek op het terrein van het niet-destructieve testen van materialen ondervindt.

Ingegaan is op het ontstaan van de diverse golftypen, de brekings- en verstrooiende eigenschappen van materialen en het optreden van anisotropie.

Aangegeven is dat deze problematiek verminderd kan worden door verbeterde transducententechnologie, inverse filtering en meer-kanaals-technieken.

Op ieder van deze terreinen zijn nieuwe ontwikkelingen te signaleren.

De meer-kanaalstechnieken zullen in een modern systeemconcept grotendeels digitaal worden opgezet. De toe te passen verwerkings-techniek is beschreven en een afbeeldingsresultaat van de inspectie op een betonelement is gegeven.

Gerealiseerd dient hierbij te worden dat de inhomogene structuur van beton dit materiaal tot één van de zeer moeilijk te inspecteren materialen maakt.

Deze techniek, die op een fundamentele behandeling van de golfvergelijking berust, vindt op andere terreinen reeds een ruime toepassing en verdient ook een grotere bekendheid op het terrein van het niet-destructieve testen van materialen.

Naast de ontwikkeling van deze geavanceerde inspectietechnieken blijft het alleszins gewenst om in de constructiefase van een produkt aan de inspecteerbaarheid van het produkt grote aandacht te besteden.

Daarbij kan gesteld worden dat betrouwbaar construeren ook inspecteerbaar construeren inhoudt.

Literatuur

1. Szilard, J. - Ultrasonic Testing - Non-conventional testing techniques, Chapter 1, John Wiley & Sons, Chicester, 1982
2. Hall, K.G. - Non-destructive Testing, 17, 121, 1976
3. Baer, R.L. and Kino, G.S. - A shear wave transducer array for real time imaging, G.L. Report no. 3455, Stanford, California, 1982
4. Verhulst, K. - Signaalverwerking bij ultrasoon onderzoek van grofkorrelig materiaal; XIVI/INVNDO - leergang "NDO-keurenswaardig", THT, 1981
5. Berkhout, A.J. - 1977, Least-squares inverse filtering wavelet deconvolution, Geophysics, vol. 42.
6. Berkhout, A.J., Ridder, J., v.d. Wal, L.F.- Acoustic imaging by wave field extrapolation, Part I: Theoretical considerations 10th International Symposium on acoustical imaging, Cannes, October 1980
7. Ridder, J., Berkhout, A.J., v.d. Wal, L.F. - Acoustic imaging by wave field extrapolation, Part II: Practical Aspects, 10th International Symposium on acoustical imaging, Cannes, October 1980