

Toepassing van interferometrische glasvezelsensoren

L.K. Cheng, D. de Bruijn en A.J.A. Bruinsma
TNO-TPD, Stieltjesweg 1, 2628 CK Delft

De toepassing van glasvezels voor telecommunicatie is niet meer weg te denken in een moderne maatschappij. De huidige generatie glasvezels is zodanig geoptimaliseerd dat de demping minder is dan 0.5 dB/km. Het onderzoek naar glasvezel voor toepassing in telecommunicatie komt ook ten goede voor andere toepassingen van de glasvezel. Zo zijn er verschillende typen speciale glasvezels ontwikkeld:

- UV en IR vezel voor spectrometrie
- vezel met een grote NA voor toepassing in een glasvezelgyroscop
- polarisatie behoudende vezel voor sensor-toepassingen
- met specifieke elementen gedoteerde vezel voor glasvezellasers of optische versterkers
- vezel met een speciale coating voor toepassingen in omgeving met een hoge temperatuur.

In veel lasersystemen en spectrometer-systemen worden glasvezels al gebruikt als flexibel transportmedium van het licht van de bron naar de gewenste locatie. Een andere toepassing van glasvezels die steeds meer belangstelling krijgt, is de glasvezelsensor. Een belangrijke groep glasvezelsensoren is gebaseerd op interferometers. Bij TNO-TPD wordt er sinds 1985 onderzoek verricht aan sensorsystemen die gebaseerd zijn op een glasvezelinterferometer.

Glasvezelsensoren

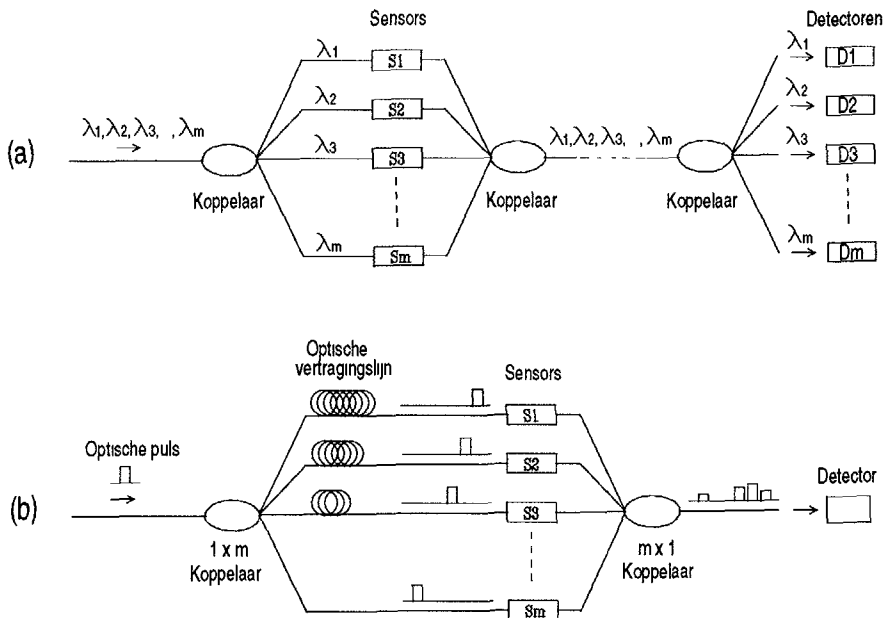
Eigenschappen

Bij de glasvezelsensor wordt informatie van de te meten grootte omgezet in een

verandering van één van de eigenschappen van het licht, bijvoorbeeld intensiteit, fase, polarisatie, enzovoort. Door het toepassen van dezelfde glasvezel kan vaak het licht over grote afstanden getransporteerd worden zonder tussenkomst van elektrische componenten of verwerkingsunits. In een aantal situaties biedt de glasvezelsensor dan een oplossing voor meetproblemen waarvoor een elektrische sensor niet inzetbaar is. Enkele voorbeelden zijn.

- metingen op locaties waar brand- of explosiegevaar heerst, b.v. petrochemische of procesindustrie
- metingen op locaties waar sterke elektromagnetische verstoring is, b.v. energiecentrales
- het produceren van elektromagnetische velden ongewenst is, b.v. ziekenhuis, vliegtuigen
- een grote afstand tussen de sensor en de signaalverwerkingsunit, b.v. een hydrofoon(array).

Een ander voordeel van glasvezelsensoren is de mogelijkheid om meerdere sensoren via één enkele vezel te adresseren en uit te lezen, het zogenaamde multiplexen (zie figuur 1). Voor een aantal toepassingen is het zelfs mogelijk dat de gehele glasvezel gevoelig gemaakt wordt voor de te meten grootte, en via een soort radarachtige techniek (de zogenaamde Optical Time Domain Reflectometry) de locatie en de amplitude van het te meten grootte achter te halen. Deze techniek is zeer geschikt voor bewaking over een grote lengte. Op grond van dit principe is er een commer-



Figuur 1
 Multiplexing van glasvezelsensoren (a) Golflengtemultiplexing. (b) Tijdmultiplexing

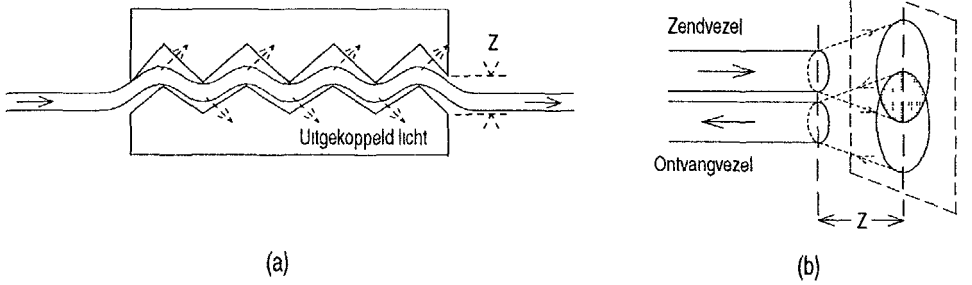
cieel glasvezel sensorsysteem op de markt waarmee de temperatuurverdeling langs een glasvezel van tientallen kilometers gemeten kan worden. Een ander voorbeeld van het toepassen van OTDR technieken in glasvezel sensoren binnen Nederland is de Nieuwe Generatie Trein Detectie [1] om de locatie en snelheid van treinen te meten.

Behalve de genoemde voordelen kennen glasvezelsensoren ook een aantal nadelen. Zoals de meeste nieuwe producten kampen glasvezelsensoren ook met het probleem van onbekendheid en beperkte acceptatie. Omdat er geen grote series worden gefabriceerd, worden deze sensoren in het algemeen volledig met de hand geassembleerd. Hierdoor blijft de prijs relatief hoog en is de spreiding in kwaliteit groter dan bij de elektrische sensoren.

Typen glasvezelsensoren

Glasvezelsensoren kunnen globaal onder-

verdeeld worden in 2 groepen, de intrinsieke glasvezelsensoren en de extrinsieke glasvezelsensoren. In de regel wordt een sensor waarin de glasvezel alleen als transportmedium van licht gebruikt wordt, een extrinsieke glasvezelsensor genoemd. Dit in tegenstelling tot een intrinsieke glasvezelsensor waarin het licht in de glasvezel gemoduleerd worden door de te meten grootte. In figuur 2 is een voorbeeld van een intrinsieke en een extrinsieke glasvezelsensor voor het meten van verplaatsing weergegeven. De gepresenteerde intrinsieke sensor (fig. 2a) maakt gebruik van de eigenschap dat bij scherpe bochten licht uit de glasvezel wordt gekoppeld. De transmissie van de vezel is dan afhankelijk van de afstand z. De extrinsieke sensor (fig. 2b) bestaat uit een zend- en een ontvangvezel. Licht uit de zendvezel wordt gereflecteerd door het oppervlak A. Een gedeelte van het gereflecteerde licht wordt daarna ingevangen door de ontvangvezel. De hoeveelheid ingevangen licht is een functie van z.



Figuur 2
Glasvezelsensor voor het meten van verplaatsing z (a) Intrinsiek. (b) Extrinsiek

Andere voorbeelden van grootheden die met glasvezel sensoren gemeten kunnen worden zijn:

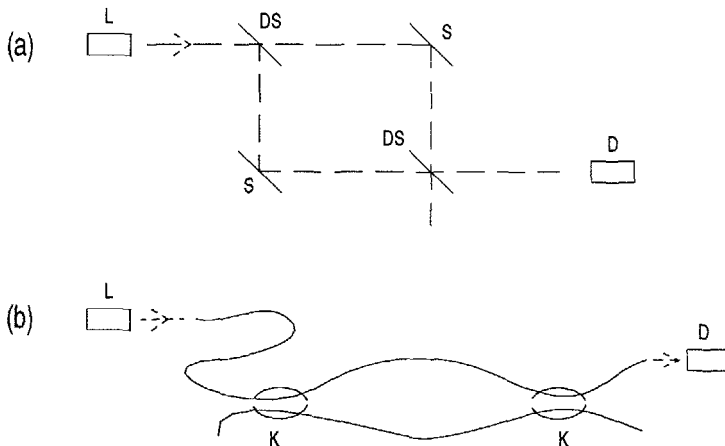
- verplaatsing, trilling of versnelling
- akoestische of statische druk
- rotatie
- temperatuur
- elektrische stroom en spanning
- concentratie van chemische stoffen

Glasvezelinterferometers

Een belangrijke groep glasvezelsensoren maakt gebruik van interferometrie. In figuur 3 wordt een conventionele Mach-Zehnder interferometer van bulk optiek (fig. 3a) en een uitvoering met glasvezel-

componenten (fig. 3b) weergegeven. De Mach-Zehnder interferometer vormt samen met de Michelson interferometer het meest gebruikte type interferometrische glasvezelsensor. Andere typen die veel voor komen zijn de Sagnac en de ring resonator. Deze twee hebben een volledig andere karakteristiek en worden in dit artikel niet verder behandeld.

Opgemerkt moet worden dat tot nu toe de meeste ontwikkeling op het gebied van glasvezelinterferometers de Sagnac glasvezelinterferometer betreft. De Sagnac interferometer wordt bijna uitsluitend gebruikt voor het detecteren van rotatie (glasvezelgyroscop) en is sinds een aantal



Figuur 3
Mach-Zehnder interferometer L=lasers, DS=deelspiegel, S=spiegel, K=koppelaar en D=detector (a) Conventionele interferometer met bulk optiek. (b) Glasvezel uitvoering

jaren commercieel verkrijgbaar voor navigatie toepassingen in vliegtuigen, raketten en zelfs auto's.

Bij de Mach-Zehnder glasvezelinterferometer wordt licht uit een laser eerst in de glasvezel gekoppeld. Een glasvezel koppelaar splitst het licht vervolgens in de twee armen van de interferometer. Een tweede glasvezel koppelaar brengt licht van deze twee armen weer bij elkaar en er vindt interferentie plaats. Het licht wordt vervolgens door de uitgangsglasvezels van de tweede glasvezelkoppelaar naar de detector getransporteerd. Deze zet het optische vermogen van het interferentiesignaal om in een elektrisch signaal. Het elektrische interferentiesignaal V is o.a. een functie van het armlengteverschil ΔL tussen de twee armen van de interferometer:

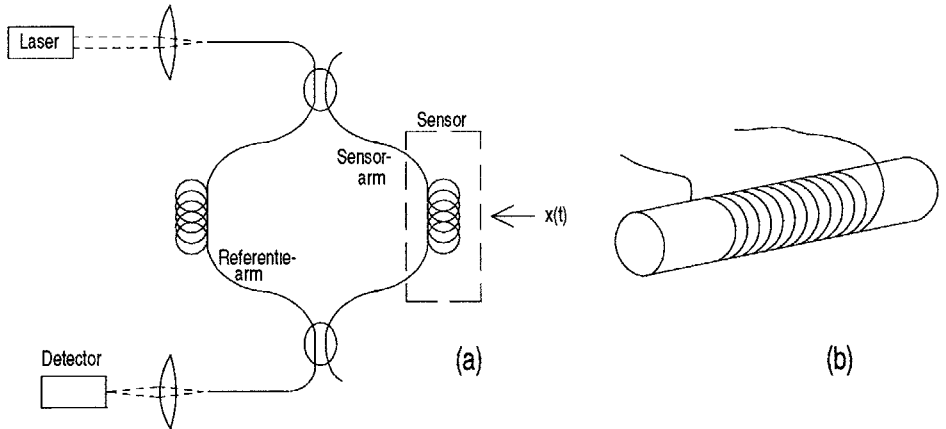
$$V = V_0 \left[1 + A \cos \left(\frac{N_{eff} 2\pi}{\lambda} \Delta L \right) \right]. \quad (1)$$

Hierin is V_0 het signaalniveau bij afwezigheid van interferentie, A het contrast van het interferentiesignaal, N_{eff} de effectieve

brekingsindex van de glasvezel en λ de gebruikte golf lengte. Aangezien V een periodieke functie is van ΔL , is het niet mogelijk om ΔL alléén op grond van V éénduidig te bepalen. Echter, bij constante V_0 , A , N_{eff} en λ kan de verandering van ΔL berekend worden uit de verandering van het signaal V .

We zullen ΔL splitsen in een statisch gedeelte L_0 en een tijdsafhankelijk gedeelte $L(t)$ welke de verandering van ΔL vertegenwoordigt. Bij toepassingen van interferometrische glasvezelsensoren gaat in het algemeen om het meten van $L(t)$. De interferometrische meetmethoden staan bekend om hun extreem hoge gevoeligheid. Met een glasvezelinterferometer kan gemakkelijk een verandering van minder dan een nm gedetecteerd worden.

Bij toepassing van een glasvezelinterferometer voor sensoren wordt vaak één van de armen van de glasvezelinterferometer blootgesteld aan de te meten fysische grootheid $x(t)$. Deze arm wordt dan de sensorarm genoemd. De andere arm wordt zoveel mogelijk geïsoleerd van de te meten grootheid en wordt de referentiearm genoemd (zie fig. 4a)



Figuur 4 Interferometrische glasvezelsensor (a) Basis opbouw. (b) Wikkelen van de sensorarm om een flexibele cilinder voor het verhogen van de gevoeligheid van akoestische druk

In een interferometrische glasvezelsensor veroorzaakt de te meten grootte $x(t)$ een armlengteverandering $L(t)$. Bij het ontwerpen van een glasvezelsensor zal getracht worden de sensor zo gevoelig mogelijk te maken voor de te meten grootte. Dit kan worden bereikt door de hoeveelheid vezel in de sensorarm die blootgesteld wordt aan $x(t)$ te vergroten, of een mechanisme te gebruiken dat de overdracht van $x(t)$ naar $L(t)$ versterkt. Voor het meten van verschillende grootheden zijn in de jaren verschillende mechanismen ontwikkeld. Een bekend voorbeeld is het wikkelen van een stuk glasvezel om een flexibele cilinder voor het meten van akoestische druk (zie fig. 4b). Hiermee kan de drukgevoeligheid t.o.v. een stuk kale glasvezel met een aantal ordes worden verhoogd.

Zoals eerder is gemeld, is een interferometrische glasvezelsensor zeer geschikt voor het meten van veranderingen. Met uitzondering van het Sagnac type glasvezelinterferometer die nagenoeg alleen toegepast wordt voor het detecteren van rotatie, worden interferometrische glasvezelsensoren voornamelijk ontwikkeld voor het meten van trilling, akoestische druk en versnelling.

Een interferometrisch glasvezelsensysteem bestaat uit het optische gedeelte (laser, glasvezelcomponenten en detectoren), het mechanische gedeelte (de sensor) en het signaalverwerkingsgedeelte (demodulator). Voor een optimaal sensorensysteem moeten deze drie gedeeltes goed op elkaar afgestemd zijn.

De signaalverwerking

Een belangrijk onderdeel in een interferometrisch glasvezelsensysteem is de signaalverwerking. Bij de signaalverwerking van een glasvezelinterferometer is het gebruikelijk om met het faseverschil ϕ tussen de interferometerarmen te werken in plaats van armlengteverschil. We introduceren nu het faseverschil ϕ welke bestaat uit een statisch gedeelte ϕ_0 (=

$(N_{\text{eff}}2\pi/\lambda)L_0$) en een tijdsafhankelijk gedeelte $\phi(t)$ ($= (N_{\text{eff}}2\pi/\lambda)L(t)$). Verg. 1 kan dan herschreven worden als:

$$V(t) = V_0 [1 + A \cos(\phi_0 + \phi(t))] \quad (2)$$

Verder definiëren we de gevoeligheid S van de sensor als $\phi(t)/x(t)$. Vergelijking 2 wordt:

$$V(t) = V_0 [1 + A \cos(\phi_0 + S x(t))] \quad (3)$$

Het is wenselijk voor een sensorsysteem om uiteindelijk een signaal te krijgen dat proportioneel is met de te meten fysische grootte $x(t)$. Het interferentiesignaal van Verg. 2 voldoet niet aan deze wens. Hiervoor zijn verschillende demodulatie technieken ontwikkeld. Enkele voorbeelden zijn:

1. homodyne detectie met kwadratuurstabilisatie,
2. fase detectie in combinatie met een draaggolf,
3. sin/cos signaalverwerking in combinatie met laser modulatie,
4. symmetrische demodulator in combinatie met een 3x3 koppelaar

Ontwikkeling van interferometrische glasvezelsensoren bij TNO-TPD

Bij de TPD wordt er sinds 1985 onderzoek verricht aan interferometrische glasvezelsensoren. In het begin werd homodyne detectie met kwadratuurstabilisatie gebruikt. De laatste jaren hebben we de symmetrische demodulator uitvoerig onderzocht.

Homodyne detectie met kwadratuurstabilisatie

Beschouw de cosinus-term in Verg. 1. Deze kan gesplitst worden tot.

$$\begin{aligned} \cos(\phi_0 + \phi(t)) &= \cos(\phi_0) \cos(\phi(t)) - \sin(\phi_0) \sin(\phi(t)) \\ &= \cos(\phi_0) \left(1 - \frac{\phi(t)^2}{2!} + O(\phi(t)^4) \right) - \\ &\quad \sin(\phi_0) \left(\phi(t) - \frac{\phi(t)^3}{3!} + O(\phi(t)^5) \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Voor het toepassen van de homodyne detectie met kwadratuurstabilisatie moet het systeem aan 2 voorwaarden voldoen

1. $-\pi/2 < \phi(t) < \pi/2$. Hierdoor kunnen we de termen van de orde 3 of hoger verwaarlozen.
2. De golflengte van de laser moet afstembaar zijn of de lengte van de referentie-arm (en daarmee L) moet instelbaar zijn. Hiermee kan ϕ_0 gelijk aan $n\pi + \pi/2$ gehouden worden. Dit wordt de kwadratuurstabilisatie genoemd. TPD gebruikt voor de kwadratuurstabilisatie het variëren van de golflengte van de gebruikte diodelaser. Het voordeel is dat er géén actieve onderdeel in de glasvezel-sensor aanwezig is.

Onder de genoemde voorwaarden is $V(t)$ dan lineair met $\phi(t)$:

$$V(t) = V_0 \left[1 - A \phi(t) \right]. \quad (5)$$

De gestelde voorwaarden zijn tevens de beperkingen van deze methode van signaalverwerking. Om een zo laag mogelijke detectiegrens te bereiken wordt de sensor vaak zo ontworpen dat de gevoeligheid S zo hoog mogelijk is. Dit is tegenstrijdig met de eerste voorwaarde. Om aan de tweede voorwaarde te voldoen moet een afstembare laser gebruikt worden. De golflengte van een diode laser kan in beperkte mate verstemd worden door de temperatuur van de diode laser of de laser stroom te veranderen. Deze simpele en low-cost methode heeft als probleem dat bij bepaalde instellingen van de laser er abrupte sprongen in de golflengte optreden (mode-hopping). Sinds een aantal jaren is de afstembare

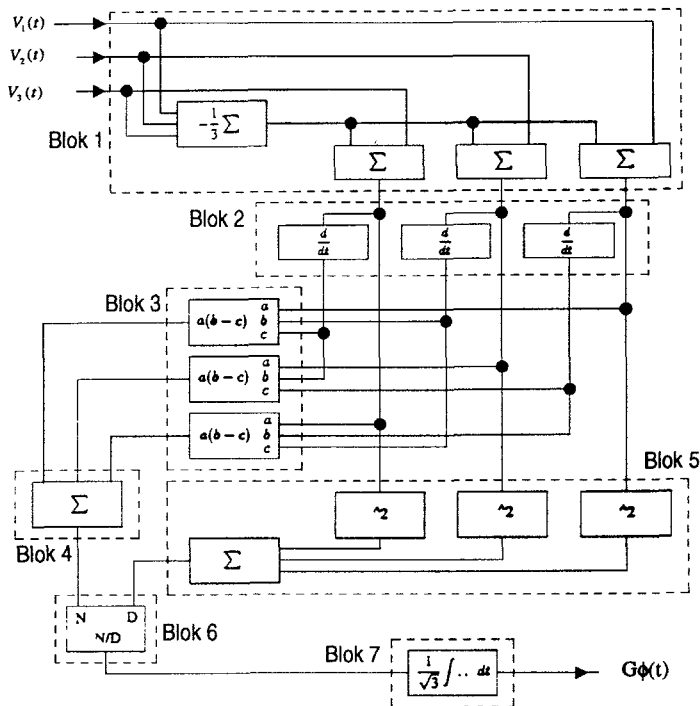
External Cavity Diode Laser (ECDL) commercieel verkrijgbaar. Eén van de speciale eigenschappen van dit type laser is een groot golflengtebereik zonder mode-hopping. Dit type laser is zeer geschikt als bron voor de interferometrische glasvezel-sensor. De prijs van dit type lasersysteem is echter relatief hoog.

De symmetrische demodulator in combinatie met een 3x3 koppelaar

Volledig analoog aan de Mach-Zehnder interferometer in bulk optiek uitvoering, zijn de interferometersignalen uit de twee uitgangspoorten van de tweede glasvezel koppelaar in tegenfase (een faseverschil van $\pi (= 2\pi \text{ per } 2 \text{ uitgangspoorten})$). De in fig. 3 geschetste koppelaars hebben twee ingangen en twee uitgangen en worden 2x2 koppelaars genoemd. Wanneer de tweede koppelaar in de Mach-Zehnder interferometer vervangen wordt door een 3x3 koppelaar, dan zijn er 3 uitgangssignalen beschikbaar. Het onderlinge faseverschil van deze signalen bedraagt $2\pi/3$. De signalen V_1 , V_2 en V_3 uit de drie uitgangspoorten zien dan als volgt uit:

$$\begin{aligned} V_1(t) &= V_0 \left[1 + A \cos(\phi_0 + \phi(t)) \right], \\ V_2(t) &= V_0 \left[1 + A \cos\left(\phi_0 + \phi(t) - \frac{2\pi}{3}\right) \right], \\ V_3(t) &= V_0 \left[1 + A \cos\left(\phi_0 + \phi(t) + \frac{2\pi}{3}\right) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Verschillende (analoge of digitale) demodulatie technieken kunnen gebruikt wor-

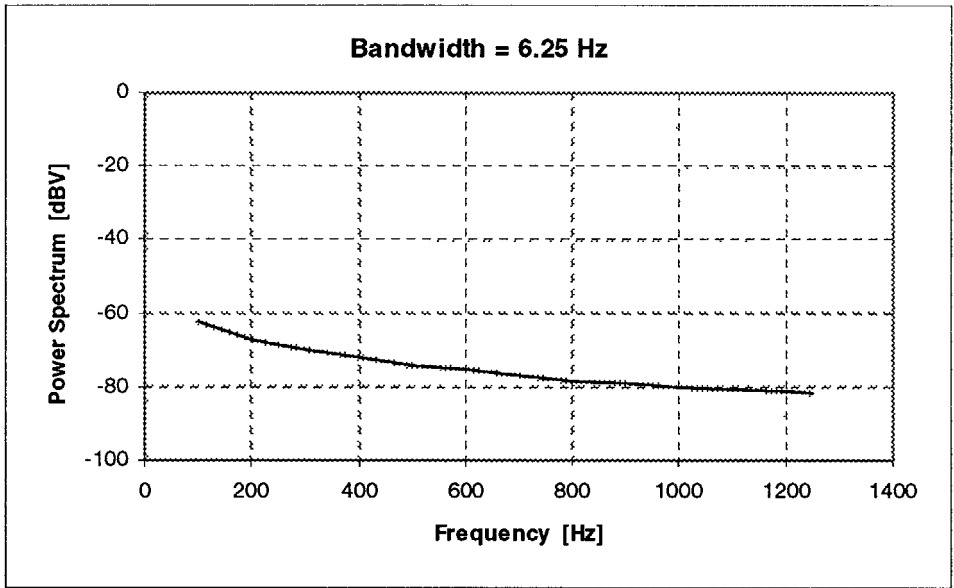


Figuur 5
 Blokschema van de symmetrische demodulator

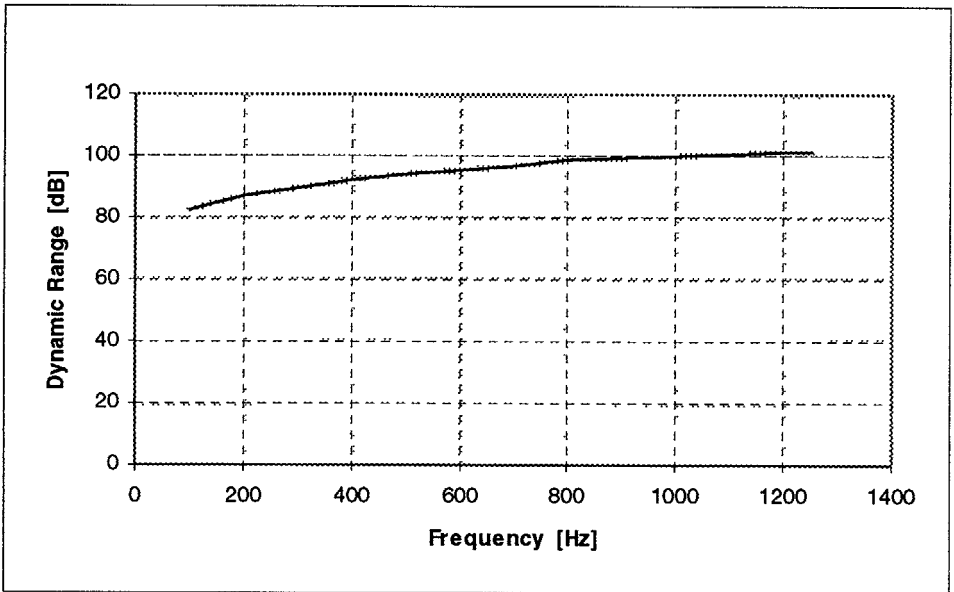
den voor het herleiden van $\Phi(t)$ uit de drie interferometer signalen [2]. TPD heeft gekozen voor de techniek die door Cameron [3] is ontwikkeld. Voordeel van deze techniek is dat langzame fluctuaties in V_0 en A automatisch gecompenseerd worden. Een blokschema van deze demodulatie techniek is weergegeven in fig. 5. De drie interferometer signalen worden eerst gecompenseerd voor verandering in V_0 welke veroorzaakt wordt door variatie in het optisch vermogen (Blok 1). Daarna worden de signalen gedifferentieerd (Blok 2). Door de 3 signalen met elkaar te vermenigvuldigen, aftrekken en sommeren (Blok 3 en 4) komt er op de uitgang van Blok 4 een signaal dat evenredig is met de afgeleide van $\Phi(t)$. Hierbij verdwijnt Φ_0 uit de verdere bewerking. De verandering in het contrast A

wordt berekend met Blok 5. Blok 6 voert daarna een normering voor deze verandering uit. Het signaal uit Blok 6, dat evenredig is met de afgeleide van $\Phi(t)$, is dan niet meer afhankelijk van V_0 en het contrast A . Na het integreren (Blok 7) krijgen wij een signaal V_D dat evenredig is met het fasesignaal $\Phi(t)$. Het demodulator signaal V_D is gelijk aan $G\Phi(t)$. De schaalfactor G wordt uitgedrukt in V/rad en is het product van alle versterkingsfactoren in alle blokken van de demodulator.

In de door TPD ontwikkelde demodulator zitten een aantal differentiators en integrators. Deze bepalen het frequentiebereik van de demodulator. De demodulator kan zodanig ontworpen worden dat de schaalfactor G over een frequentiebereik van ca



Figuur 6
Ruisspectrum van het signaal uit de demodulator die aangesloten is op een glasvezelinterferometer.



Figuur 7
Dynamisch bereik van het testsysteem dat opgebouwd is uit een glasvezelinterferometer en demodulator.

De TPD demodulator is getest met behulp van een glasvezelinterferometer. Het ruisniveau van dit systeem bij een schaalfactor van 1 V/rad is weergegeven in fig. 6. Aangezien het maximale uitgangssignaal van de demodulator gelijk is aan ± 15 V ($30 V_{\text{eff}} = 20\text{dBV}$), kan het dynamisch bereik van het systeem berekend worden (fig. 7). Het dynamisch bereik neemt toe met de frequentie. Vanaf ca. 100 Hz is het dynamisch bereik meer dan 80 dB.

Een belangrijke parameter van een sensorsysteem is de detectiegrens. Voor het geteste interferometrische systeem is de detectiegrens bij 1000 Hz gelijk aan $40 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ welke overeenkomt met $3.4 \times 10^{-12} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$. De TPD demodulator is de afgelopen jaren ingezet voor verschillende sensorsystemen.

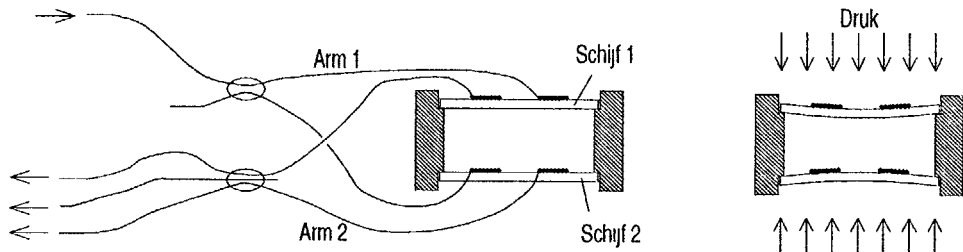
Voorbeelden van R&D projecten

Sinds 1985 werkte TPD aan de ontwikkeling van interferometrische glasvezel-sensorsystemen. Aan het begin werd onderzoek verricht naar verschillende glasvezelcomponenten en het opbouwen van kennis over glasvezelinterferometers. In de laatste 5 jaar ligt de nadruk op de ontwikkeling van de verschillende prototype sensoren en de demodulator. Recentelijk is het onderzoek gestart naar het multiplexen van sensoren.

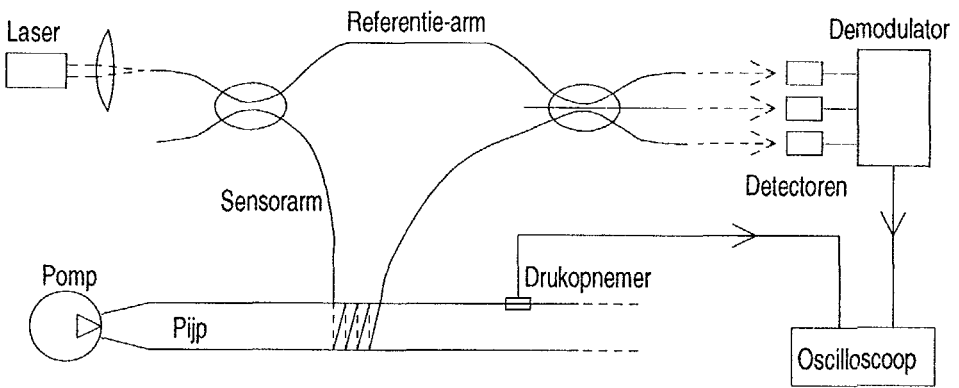
Hydrofoon

Het omvangrijkste onderzoek is de glasvezelhydrofoon in opdracht van de Koninklijke Marine. Een hydrofoon is in feite een onderwater microfoon en vindt zijn toepassing bij o.a. defensie, geofysica en seismologie. De laatste TPD hydrofoon is een variant op het ontwerp dat door Brown [4] is geïntroduceerd. Hierbij wordt de sensor-arm in een spiraal gewikkeld en op een schijf bevestigd. De schijf vervormt zich bij aanwezigheid van de te meten akoestische druk. De vervorming van de schijf introduceert een rek in de glasvezel en wordt gedetecteerd met het interferometersysteem. In 1995 is een veldtest uitgevoerd op een Nederlands binnenwater [5]. De gebruikte sensor bestaat uit twee identieke schijven (fig 8). Elk van de twee armen van de glasvezelinterferometer wordt op een schijf bevestigd zodanig dat bij aanwezigheid van overdruk de arm op schijf 1 korter wordt en de andere arm op schijf 2 in de zelfde mate langer wordt. In dit geval worden beide armen gebruikt voor het meten van de akoestische druk. Het resultaat is een dubbele gevoeligheid t.o.v. een systeem waarbij slechts één arm wordt gebruikt.

De geteste hydrofoon heeft een gevoeligheid van $0.13 \text{ rad}/\text{Pa}@500 \text{ Hz}$. Gegeven de detectiegrens van de demodulator kan de minimum detecteerbare akoestische druk bepaald worden. Deze bedraagt ca. $550 \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$.



Figuur 8
De TPD glasvezelhydrofoon. Beide armen van de glasvezelinterferometer worden gebruikt voor het detecteren van de akoestische druk.



Figuur 9
Opstelling voor het testen van de pulsatiesensor

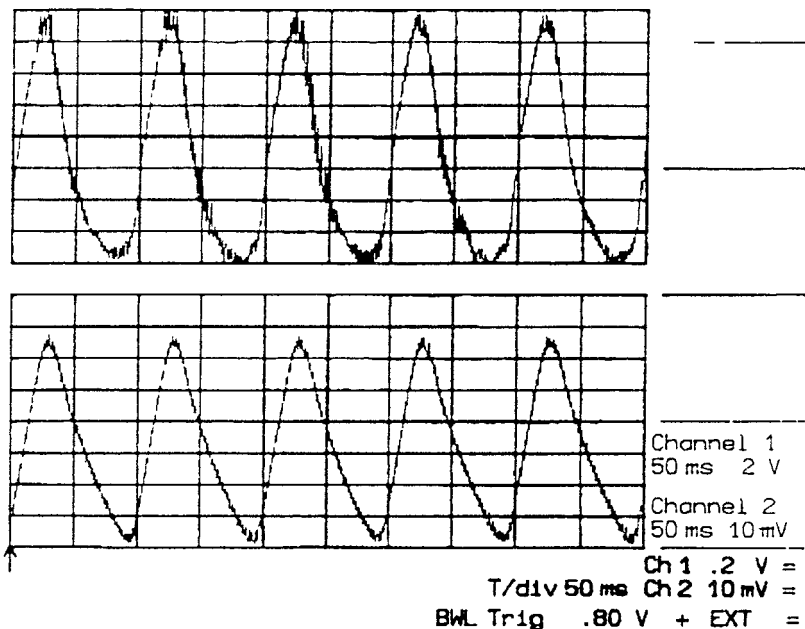
Voor de glasvezelhydrofoon is een compensatie mechanisme voor hydrostatische druk ontwikkeld. Dit compensatie mechanisme maakt een hoge gevoeligheid van de glasvezelhydrofoon in combinatie met een grote werkdiepte (= grote hydrostatische druk) mogelijk. Hierop is in 1996 octrooi aangevraagd.

Pulsatiesensor

Een andere ontwikkeling van interferometrisch glasvezelsensorsysteem betreft een pulsatiesensor. Deze is ontwikkeld voor het detecteren van (afwijkingen in) drukpulsen in een pijpleiding. Bij verschillende industriële processen worden pijpleidingssystemen ingezet voor transport. De pompen en regelkleppen in deze systemen veroorzaken drukpulsen welke karakteristiek zijn voor het pijpleidingssysteem. Door de afwijking van de drukpuls te detecteren kunnen beginnende defecten van pompen of regelkleppen worden opgespoord. In veel bestaande installaties zijn echter géén drukopnemers aanwezig en het stilleggen van een installatie voor het aanbrengen van drukopnemers in de pijpen is financieel en/of logistiek niet mogelijk. Hiervoor is de toepassing van een interferometrisch glasvezelsensorsysteem voor het meten van pulsatie onderzocht

Deze pulsatiesensor is gebaseerd op het meten van diameterverandering van de pijp welke proportioneel zal zijn met de drukpuls. De sensorarm van een glasvezelinterferometer wordt enkele slagen om de pijp gewikkeld. De demodulator verwerkt het interferometersignaal tot een uitgangssignaal welke een maat is voor de diameterverandering van de pijp.

Het eerste experiment met de pulsatiesensor is uitgevoerd met een transportpijp waarop een pomp is aangesloten (fig. 9). De frequentie van de door de pomp geleverde pulsaties is ongeveer 10 Hz. Om de werking van de pulsatiesensor te controleren is op een afstand van enkele centimeters een piezo-drukopnemer in de pijp gemonteerd. Figuur 10 toont de uitgangssignalen van de pulsatiesensor en de piezo-drukopnemer. De vorm van de drukpulsen uit beide systemen vertonen grote overeenkomst. De gebruikte demodulator is niet geoptimaliseerd voor de relatief lage frequentie. Dit is de oorzaak van de slechte signaal-ruis verhouding van de pulsatiesensor. Bij een volgend experiment zullen we de gehele glasvezelinterferometer in een kunststof manchet integreren. Hierdoor is het glasvezelsysteem minder gevoelig voor beschadigingen en trillingen.



Figuur 10

Vergelijking tussen de signalen uit de pulsatiesensor (boven) en uit de piezodrukopnemer (onder)

Verder zal de demodulator geoptimaliseerd worden voor het frequentiebereik van de pulsaties.

Andere interferometrische glasvezelsensoren

Naast de twee genoemde sensorsystemen zijn er ook onderzoeken/haalbaarheidsstudies uitgevoerd voor de volgende toepassingen:

- **Sensoren voor voertuigdetectie**

Hierbij worden verschillende typen glasvezelsensoren onderzocht welke in het wegdek geplaatst kunnen worden voor het detecteren van de passage van voertuigen. Door de amplitude van het signaal te analyseren, is het mogelijk een schatting te maken van het gewicht van het voertuig. Hierdoor kan voertuigtelling op grond van gewichtsklassen uitgevoerd worden. Dezelfde sensoren zullen ook toegepast kunnen worden voor het detecteren van treinen. Voordeel van het

interferometrische glasvezelsensorsysteem is de hoge gevoeligheid. Hierdoor kan de sensor onder de grond geplaatst worden waardoor de sensor minder gevoelig is voor verstoringen of vandalisme.

- **Versnellingsensor**

De TPD hydrofoon kan in principe ook gebruikt worden voor het meten van versnellingen. Bij versnelling in de richting loodrecht op de sensorschijf wordt de sensorschijf onder invloed van zijn eigen massa vervormd. Deze vervorming kan vervolgens op dezelfde manier als bij de glasvezel hydrofoon gemeten worden. De versnellingsgevoeligheid van één van de TPD hydrofoons is in 1995 onderzocht. De respons van de sensor is uiteraard afhankelijk van de vorm, materiaal en ophanging van de schijf.

TPD heeft in de afgelopen jaren ruime ervaring opgedaan met het ontwikkelen van

prototype interferometrische glasvezel-sensoren systemen. Hierbij is een demodulator ontwikkeld die breed inzetbaar is bij vele interferometrische glasvezelsensoren. In de toekomst ligt de aandacht op het multiplexen van sensoren en het realiseren van praktisch inzetbare sensorsystemen.

Referenties

1. M.J. vann der Hoek, J. Roos en A.J.A. Bruinsma, "Nieuwe Generatie Trein Detectie met een optisch massadetectie systeem", Nederlands Tijdschrift voor Fotonica, 19^e jaargang nr. 1, blz. 13 - 17, februari 1993
2. B. Chiu and M.C. Hastings, "Digital demodulation for passive homodyne optical fiber interferometry based on a 3x3 coupler", Proceedings of SPIE, Vol. 2292, 1994
3. C.B. Cameron et al., "A symmetric analogue demodulator for optical fiber interferometric sensors", Proc. 34th Midwest Symposium on Circuits and Systems (IEEE), Monterey, May 1991.
4. D.A. Brown, T. Hofler and S.L. Garrett, "High sensitivity, fiber optic, flexural disk hydrophone with reduced acceleration response", Fiber and Integrated Optics, Vol. 8, 1989.
5. L.K. Cheng and D. de Bruijn, "Fieldtest of a fiber optic hydrophone", Proceeding of 11th International Conference on Optical Fiber Sensors, 1996.