

6/05/83

H. J. FRANKENA, H. J. RATERINK EN C. SMORENBURG

OPTICA: STEEDS VEEL BIJDRAGEN UIT NEDERLAND

Het gebruik van optische instrumenten is in de geschiedenis van veel gebieden (scheepvaart, astronomie, geneeskunde) de basis geweest van doorslaggevende ontwikkelingen. De auteurs geven een historisch overzicht van die ontwikkelingen en komen via de stand van zaken van dit ogenblik tot een toekomstbeeld.

In 1600 begon de optica zich te ontwikkelen tot een vakgebied waaruit praktisch bruikbare resultaten voortkwamen en het is opvallend dat, al vanaf die eerste tijd, veel belangrijke bijdragen vanuit ons land zijn geleverd. Daarbij heeft steeds de instrumentatie speciaal de aandacht getrokken, hoewel natuurlijk de theoretische bijdragen van bijvoorbeeld Christiaan Huygens en H. A. Lorentz ook niet verzwegen mogen worden. Pioniers als Hans Lippershey (patent voor telescoop) en Zacharias Janssen (microscop) werden later in de zeventiende eeuw gevolgd door Willebrord Snel (studie van breking van licht bij overgang naar een andere stof) en Antonie van Leeuwenhoek (microscop). In de twintigste eeuw vindt men een voortzetting van deze traditie in het werk van F. Zernike (Nobelprijs voor de fasecontrastmicroscop), A. Bouwers (ontwerp van spiegelsystemen) en A. C. S. van Heel. Deze laatste heeft de technische optica in Delft, aan de Technische Hogeschool en bij de Technisch Fysische Dienst TNO-TH (de TPD), sterk bevorderd en belangrijke bijdragen geleverd inzake ontwerpen van lenzenstelsels en van meetmethoden, zoals het uitlijnen van grote constructies met grote nauwkeurigheid (sluizencomplex, radiotelescoop, walsstraten). De huidige activiteiten daar betekenen in wezen een voortbouwen hierop, al hebben de nieuwe technische mogelijkheden, vooral dank zij de komst van de lasers, de optica

na die tijd een geheel nieuw aanzien verschaft.

Naast fundamenteel werk ter ondersteuning, vormt ook thans nog het ontwikkelen van optische stelsels, dat wil zeggen het ontwerpen en vervaardigen van een bruikbaar stuk gereedschap of systeem, de hoofdmoot van het werk in Delft. Daarbij kan men een globale indeling maken in drie werkterreinen: afbeeldingsstelsels, meetsystemen en dunne lagen/golfgeleiders. De toepassingen behelzen een golflengtegebied dat breder is dan het zichtbare deel van het spectrum: ook aan optiek voor bijvoorbeeld infrarode, ultraviolette en röntgenstraling wordt aandacht besteed. Bij de meeste activiteiten spelen lasers een belangrijke rol. Speciale typen worden zonnodig in samenhang hiermee ontwikkeld. In wezen heeft de laser niet echt geleid tot onvoorziene zaken; veeleer kan men stellen dat talloze vindingen die reeds bekend waren (raman- en brillouinverstrooiing, holografie, niet-lineaire optica, interferometrie) dank zij de laser plotseling van technische betekenis werden.

Een activiteit die enigszins los staat van het voorgaande is het bewerken van materialen met behulp van laserlicht. Zulke technieken hebben nieuwe mogelijkheden geopend, zowel ten aanzien van de te bewerken materialen als van de bewerkingen zelf. Teneinde ook kleine en middelgrote bedrijven toegang te verlenen tot de doorgaans kostbare



H. J. Raterink (58) studeerde in 1951 af als natuurkundig ingenieur aan de Technische Hogeschool te Delft. Na het beëindigen van de militaire dienstdienst trad hij in 1953 als wetenschappelijk medewerker voor optisch onderzoek bij de TPD in dienst. Hij bracht het jaar 1963 door in Amerika; tijdens dit verblijf kwam hij in aanraking met de laser. In 1964 nam hij bij de TPD het initiatief tot een onderzoekprogramma gericht op lasertechnologie en toepassingen van de laser. Zijn huidige functies zijn coördinator van de hoofdafdeling Optische Instrumentatie en hoofd van de afdeling Fysische Optica van de TPD.



H. J. Frankena (50) studeerde elektrotechniek aan de Technische Hogeschool Delft. In 1958 keerde hij naar dit instituut terug als wetenschappelijk medewerker en specialiseerde zich in de theoretische elektriciteitsleer, met de nadruk op microgolfgeleiders. In 1965 werd hij benoemd tot lector aldaar, en promoveerde in 1967. In 1970 werd hij benoemd tot hoogleraar in de theoretische en experimentele natuurkunde aan de Afdeling der Technische Natuurkunde van de THD, om onderwijs te geven in de optica.



C. Smorenburg (40) studeerde aan de TH-Delft, afdeling der Technische Natuurkunde. Sinds 1968 is hij werkzaam bij de Technische Fysische Dienst en houdt zich voornamelijk bezig met het ontwikkelen van optische systemen voor uiteenlopende toepassingen, met name m.b.t. ruimtevaart en aardobservatie.

gouereus aan te geven en blijkt in de praktijk de overstap van het ene veld naar het andere zeer wel mogelijk.

Keuze van 18-jarigen

Als ik hierboven het vak van technisch fysicus of natuurkundig ingenieur sterk heb afgezet tegen dat van de universitaire physicus, lijkt het dienstig dit aspect te relativeren. Tenslotte wordt de samenstelling van de beroepsbevolking verregaand bepaald door de niet altijd op diep inzicht gebaseerde keuze van 18-jarigen. Wat dat betreft studeren natuurlijk een aantal studenten natuurkunde die naar later blijkt qua karakter en temperament eigenlijk een ingenieur zijn en vice versa zijn er afgestudeerde natuurkundig ingenieurs die zich het grootste deel van hun leven meer aan de zuivere natuurkunde wijden.

Dit artikel zou niet compleet zijn zonder een poging om de essentie van de bijdrage in onze samenleving van de natuurkundig ingenieur kort te beschrijven. Ik kom hierbij tot twee aspecten.

Het eerste zou ik willen beschrijven in de zin dat hij zich bezig houdt met het doen van metingen aan en het maken van een theoretische beschrijving of model van door de mens gemaakte of gewenste configuraties. Zijn methodiek hierbij is verregaand dezelfde als die van de experimentele natuurkundige, maar laatstgenoemde neemt de natuur als onderwerp van onderzoek en niet een door de mens gemaakte constructie. Het tweede aspect, deels overlappend met het vorige, is de niet aflatende rol van de technische fysicus de wetenschappelijke basis van producten en procesontwikkeling te versterken door gericht toegepast onderzoek.

Als wij thans in omvattende zin bezien wat de technische fysicus heeft bijgedragen aan de Nederlandse samenleving, kunnen wij vaststellen dat de effectiviteit van het onderzoek en met name de industriële research sterk positief is beïnvloed. Het heeft in aansluiting op het zojuist gezegde in

veel gevallen het wetenschappelijk fundament van de techniek verschaft dan wel versterkt. De groei en bloei van de grote research- en ontwikkelingsorganisaties van de grote ondernemingen in Nederland, zo groot in aantal gemeten naar de maatstaf van Nederland, zijn ongetwijfeld door het beschikbaar zijn van technische fysici bevorderd. De beste illustratie hiervan is wellicht het opmerkelijke feit dat de leiding van de grote industriële researchlaboratoria in ons land in veel gevallen in handen is van een natuurkundig ingenieur. In de tweede helft van de jaren zestig hadden zij zelfs vrijwel een monopolie, waaraan de namen

van Kramers, Toxopeus, Stein Callenfels, Peteri en anderen zijn verbonden. Dit heeft een hooggeplaatste in de industrie eens gebracht tot de overigens goedmoedig bedoelde term 'de mafia van de natuurkundige ingenieurs'. Het is overigens het beste bewijs dat onze samenleving er geen moeite mee heeft gehad respect te ontwikkelen voor het beroep van technisch fysicus en hem onmiddellijk als een volwaardig academicus heeft geïncorporeerd.

Dit moet ons als vanzelfsprekend voorkomen, maar indien wij denken aan het lange gevecht om sociale erkenning van de 'Dipl. Ing.' in Duitsland in de tweede

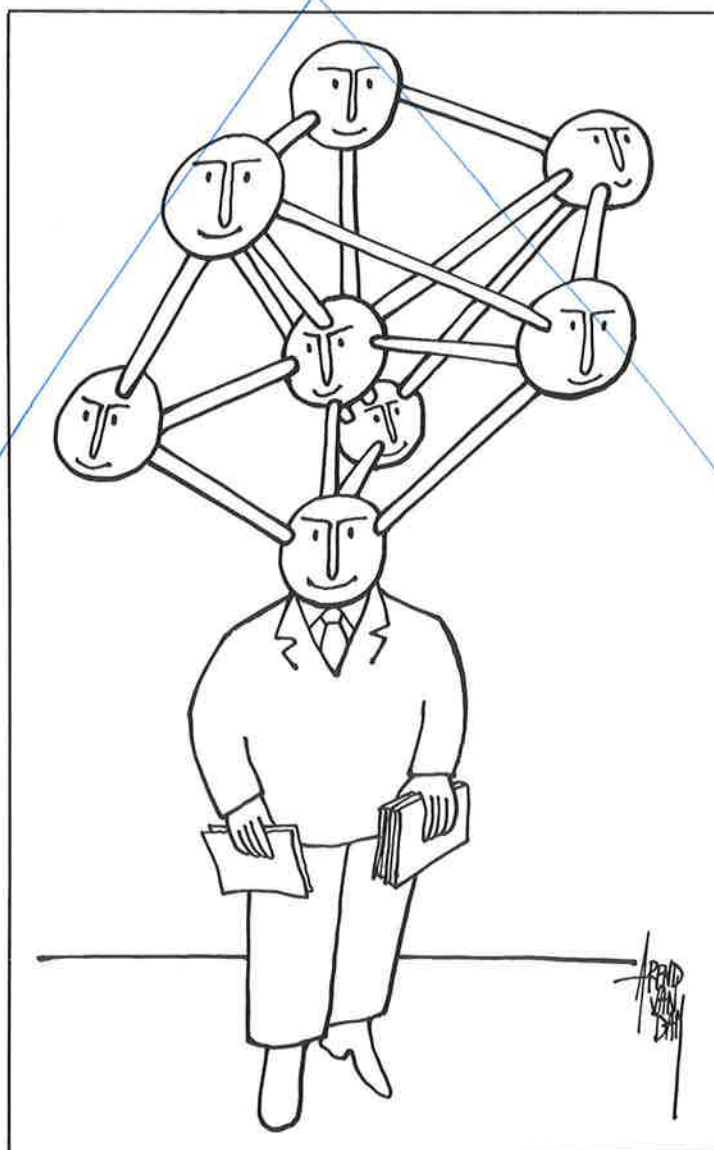
helft van de vorige eeuw en de nog steeds niet beëindigde discussie over de status van de 'engineer' in het Verenigd Koninkrijk, is dit geenszins het geval. In het verlengde van het zojuist gezegde leidde de omstandigheid dat bijna veertig jaar lang de natuurkundige ingenieurs in Nederland allen uit één en dezelfde school kwamen, tot een 'old boy network', wat impliceert dat men de collega's in hetzelfde beroep elders kent en gemakkelijk kan aanspreken.

Terugkoppeling

In het bovenstaande heb ik getracht de rol van de technische fysicus als een schakel tussen ingenieurs uit andere vakrichtingen enerzijds en tussen dezen en de zuivere wetenschap anderzijds te schetsen. Het is uiteraard geen éénrichtingscommunicatie. In feite is het een kring met positieve terugkoppeling. Het was Casimir die de uitdrukking 'wetenschap – techniek spiraal' het eerst lanceerde. Binnen de fysica is dit heel zichtbaar: fundamenteel inzicht leidt tot nieuwe mogelijkheden voor de toepassing in de techniek; nieuwe technische hulpmiddelen stellen op hun beurt de wetenschap in staat verder door te dringen in het ont-ratelen van de samenhang.

Een sprekend voorbeeld hiervan vinden wij in de elektronenmicroscopie. Deze is immers gebaseerd op gedetailleerde kennis van de beweging van elektronen in vacuüm afgeleid uit de wetten van Maxwell. Op zijn beurt heeft de elektronenmicroscopie veel wetenschappelijk onderzoek mogelijk gemaakt dat zonder dit krachtige hulpmiddel niet zou hebben kunnen plaatsvinden.

Daarnaast vormt de elektronenmicroscopie een goed voorbeeld van de synthese van veel hoofdstukken uit de klassieke fysica die beheerst moeten worden bij de bestudering van dit vakgebied. Als zodanig leent het zich bij uitstek voor de opleiding van technische fysici die de natuurkunde in zijn vele facetten in dienst kunnen stellen van de techniek. ■



apparatuur hiervoor, wordt thans, met steun van de overheid, een TNO-Laserfaciliteit opgezet. Hierin wordt samengewerkt door de TPD, het Metaalinstituut TNO en de vakgroep Quantumelektronica van de THT (Technische Hogeschool Twente).

Als algemene tendensen in de moderne optica zijn te noemen het toenemen van de nauwkeurigheid waarmee metingen kunnen worden uitgevoerd, verkleining van de details die kunnen worden waargenomen en vermindering van het golflengtegebied waarin de apparatuur moet functioneren. Dit, tezamen met de neiging tot miniaturisering van de optische componenten, zorgt voor nauwe banden met de submicrontechnologie. Een ander kenmerk van de recente ontwikkelingen is de vergaande verwerking van optische gegevens, waarbij digitale rekenautomaten en elektronische detectiesystemen een grote rol spelen. In het volgende zal van de eerder genoemde drie werktoreinen in Delft een nadere beschrijving worden gegeven.

Afbeeldingsstelsels

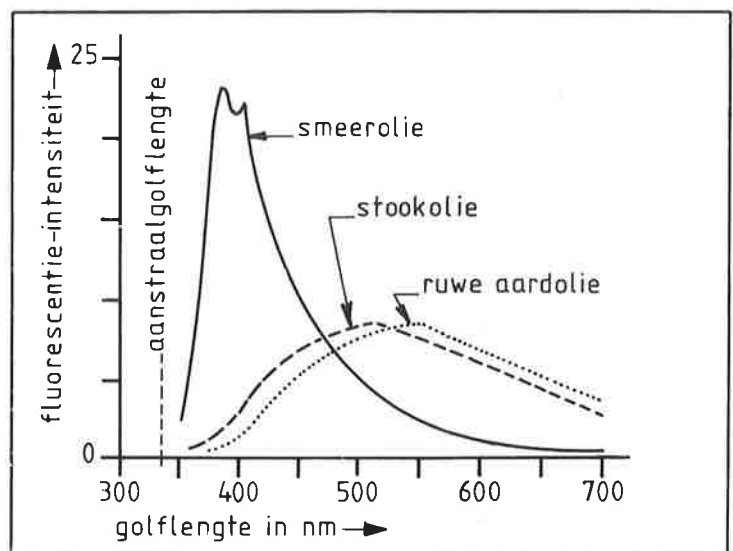
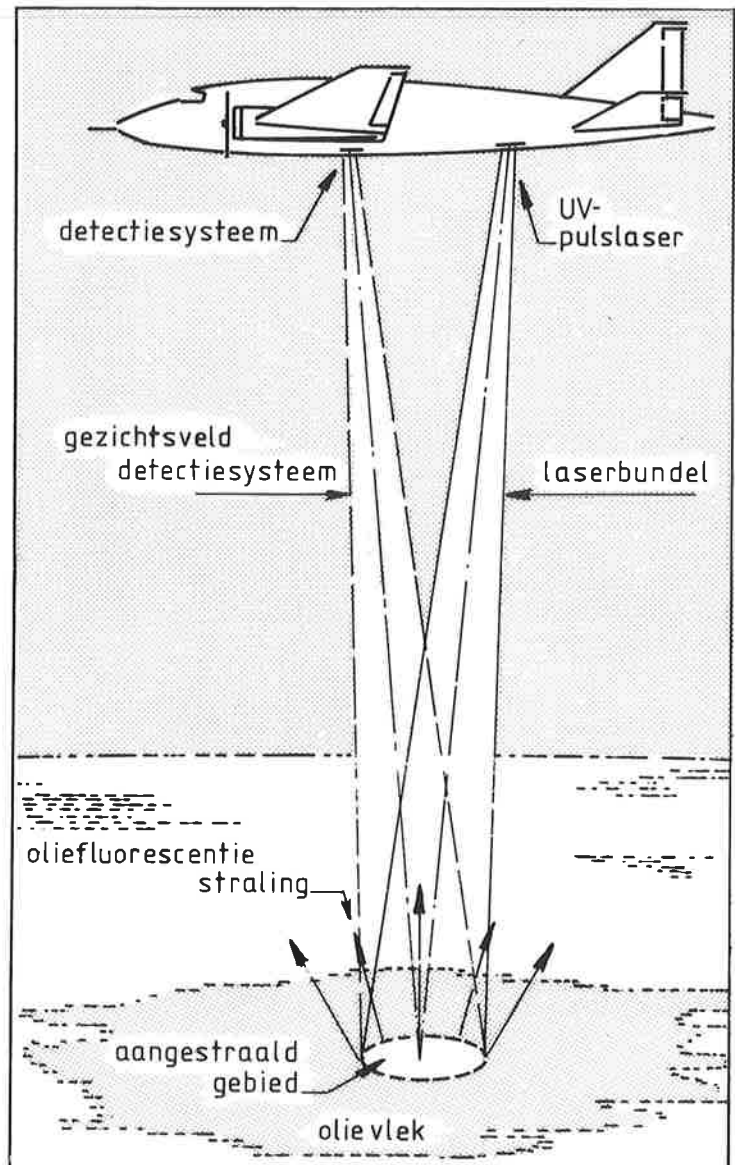
Vóór de jaren zestig bestonden optische afbeeldingsstelsels in principe uit lenzen, spiegels of combinatie daarvan en zij hadden tot doel om ergens een zo goed mogelijk gelijkend beeld te vormen van het te bestuderen voorwerp. Het ontwerpen bracht veel rekenwerk met zich mee, dat pas na de komst van de elektronische rekenautomaten voor zeer ingewikkelde optische stelsels uit te voeren was. Sinds die tijd is het opbouwen van een omvangrijk pakket van programmatuur, deels in samenwerking met de optische industrie (Oldelft), krachtig ter hand genomen. Deze rekenmethoden maakten nieuwe ontwerpstechnieken mogelijk en leidden tot het invoeren van andere criteria voor de beeldkwaliteit. Ook kreeg de ontwerper betere mogelijkheden door het gebruik van nieuwe materialen en vervaardigingstechnieken.

Detectie van olieverontreiniging op zee

Door toepassing van een actieve remote sensing techniek is het mogelijk vanuit een vliegtuig een olievlek op zee nader te analyseren. Hiertoe 'belicht' men de verontreiniging met een laserbundel met een korte golflengte (334 nm). De hierdoor opgewekte fluorescentiestraling wordt vanuit het vliegtuig waargenomen en geanalyseerd. Uit de vorm van het fluorescentiespectrum verkrijgt men informatie over de soort olie van de verontreiniging, terwijl men uit de opgevangen straling tevens de laagdikte en derhalve de omvang van de verontreiniging kan afschatten. Met deze techniek is het mogelijk een omvangrijk gebied efficiënt te inspecteren en verkrijgt men op snelle wijze die informatie, die nodig is voor het nemen van de juiste maatregelen ter bestrijding van de verontreiniging of eventueel voor opsporing van de vervuiler.

Als vervolg op de ontwikkelingen in de spectroscopie zijn echter in de laatste twee decennia, en dan vooral gestimuleerd door de mogelijkheden die de ruimtevaart biedt, andere wijzen van afbeelden naar voren gekomen. Veel nuttige informatie over voorwerpen wordt daarbij vergaard in de vorm van gegevens over de verdeling van de lichtintensiteit over de verschillende golflengten (kleuren, voorzover het zichtbare straling betreft). Als hulpmiddelen naast de klassieke componenten worden voor het uiteenrafelen van het ontvangen licht in de verschillende golflengten prisma's, maar liever nog tralies gebruikt. Binnen een smal golflengtegebiedje is de beschikbare hoeveelheid licht veelal zeer gering, en voor goede metingen zullen zulke tralies dan ook met een hoog rendement moeten werken. Succesvolle ontwikkelingen op dit gebied hebben het mogelijk gemaakt dat in Delft ontworpen en gebouwde systemen thans een brede toepassing vinden.

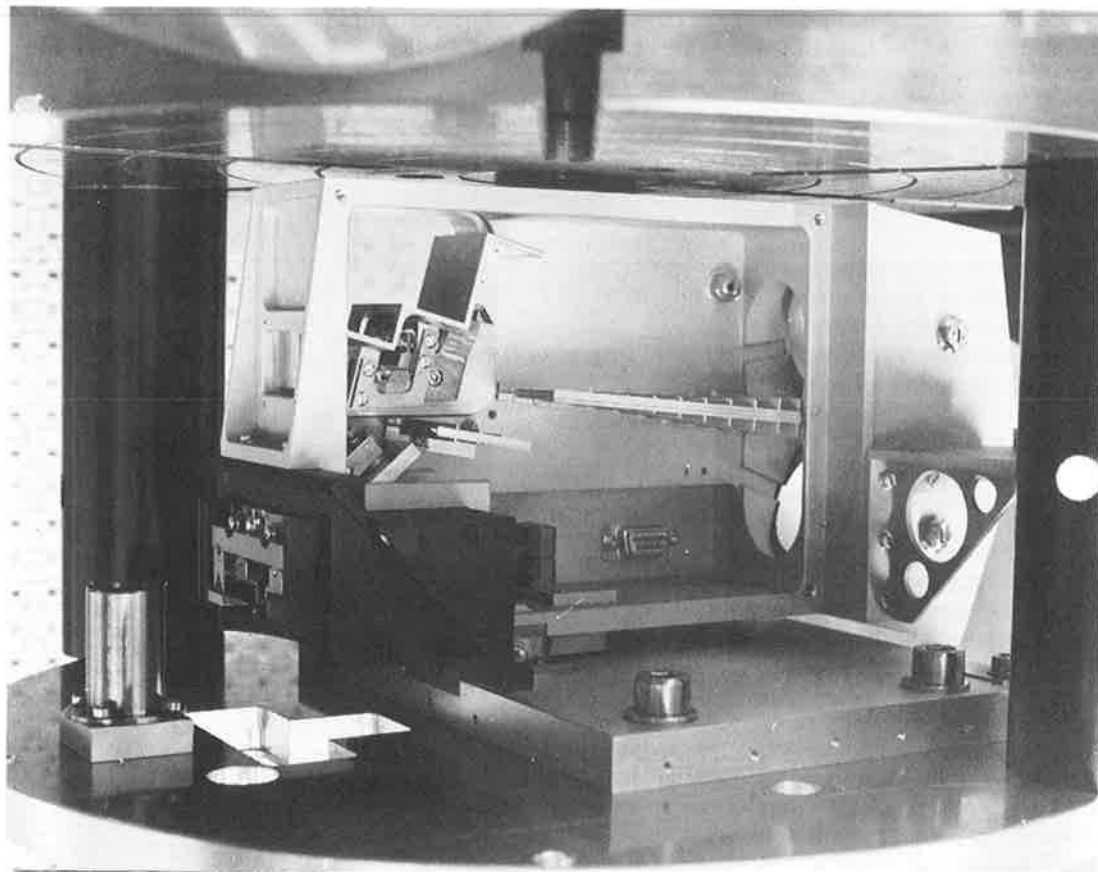
Aldaar geleverde bijdragen aan de tralietheorie hebben geleid tot opstellingen die sterk afwijken van de conventionele ('Rowland cirkel'), waardoor enerzijds soms het rendement sterk (met een factor 10-100) kan worden verbeterd en anderzijds de beeld-



kwaliteit soms aanmerkelijk kan worden opgevoerd. Ook op het gebied van optische componenten voor röntgenstraling, waarvoor geen normale lenzen of spiegels voorhanden zijn, worden dergelijke stelsels ontwikkeld. De uiteindelijke optische informatie wordt omgezet in elektrische, digitaal te verwerken, signalen. Hiervoor wordt behalve van enkelvoudige detectoren, een steeds ruimer gebruik gemaakt van rijen van detectoren, die tot enige duizenden stralingsgevoelige cellen kunnen bevatten, en van twee-dimensionale roosters, waarin het aantal cellen tot meer dan 100.000 kan oplopen. De toepassingen hiervan vindt men voornamelijk in twee aandachtsgebieden: *astronomische waarnemingen* en *remote sensing*.

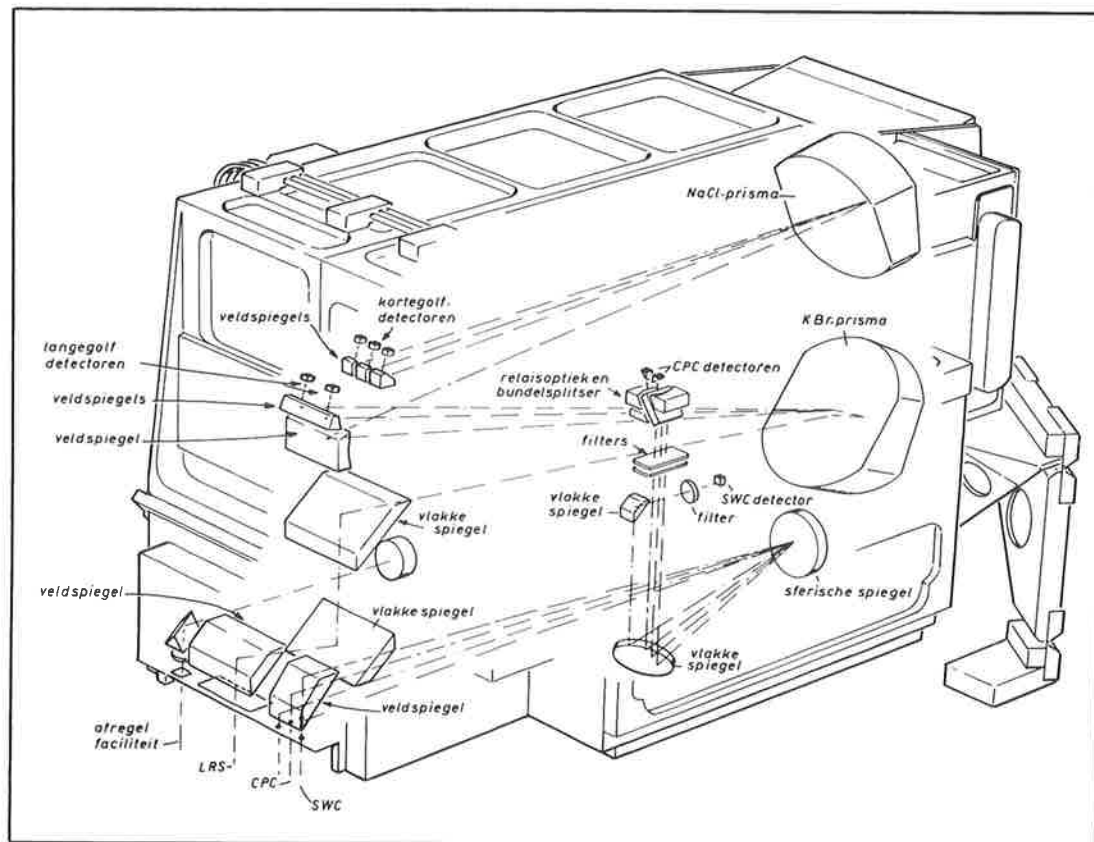
Ruimtevoertuig

Mede dank zij de vele activiteiten van de Nederlandse astronomen zijn er bij de TPD een flink aantal instrumenten voor metingen vanuit een ruimtevoertuig ontworpen en vervaardigd. Het doel was steeds om, door het analyseren van de straling naar golflengten en ruimtelijke verdeling, meer te weten te komen over fun-



Optische instrumenten voor de IRAS-satelliet

Het voornaamste instrument is een spectrometer, waarmee straling in het infrarode golflengtegebied (5-24 μm) wordt uiteengehaald in smalle spectrale bandjes. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een tweetal prisma's, die vervaardigd zijn van resp. kaliumbromide en natriumchloride. Door de oppervlakken van de prisma's gekromd te maken wordt tegelijkertijd een scherpe afbeelding van het spectrum gevormd, waardoor een zeer hoge efficiëntie wordt bereikt. Daarnaast zijn er een tweetal fotometers ontwikkeld, waarmee in een drietal brede spectrale gebieden tot in het verre infrarood de intensiteit van straling wordt gemeten. Het gehele instrument dient te functioneren bij een extreem lage temperatuur (4 Kelvin). Na de lancering begin 1983 zijn reeds een aantal verrassende verschijnselen in dit tot nu toe nauwelijks onderzochte golflengtegebied ontdekt.



damentele verschijnselen die zich elders in het heelal afspelen. Naast Nederlandse projecten (ANS, IRAS) kwamen ook een aantal stelsels in internationale samenwerking (onder andere met NASA) tot stand. Aan dergelijke instrumenten worden zeer hoge eisen gesteld. Enerzijds zijn er de specificaties met betrekking tot het golflengtegebied, de snelheid van meten en dergelijke, zoals deze door de gebruikers worden opgesteld. Anderzijds dient het instrument de zware mechanische belasting tijdens 'anchoring' te doorstaan, bij zeer lage temperaturen (enkele Kelvin) te werken en zijn er sterke beperkingen ten aanzien van ruimte en gewicht, waardoor de ontwerper gedwongen wordt voor het systeem technisch het uiterst haalbare te bereiken.

Remote sensing duidt in wezen op een normaal optisch meetsysteem, maar deze term wordt speciaal gebruikt indien het gaat om het op afstand vergaren van informatie over verschijnselen op aarde. Hiertoe wordt straling die door voorwerpen uitgezonden, doorgelaten of weerkaatst is, opgevangen en naar golflengte en intensiteit geanalyseerd. Uit deze informatie kunnen dan gevolgtrekkingen over het voorwerp gemaakt worden. Voorbeelden van stelsels die met name door de TPD zijn ontwikkeld, hebben betrekking op de samenstelling (stofsoort en concentratie) van gaswolken in de atmosfeer, soort en laagdikte van olie-verontreinigingen op water en de kleur (en daarmee de gezondheidstoestand of de mate van rijping) van gewassen te velde.

Al naar gelang de doelstelling kunnen de systemen als een vaste opstelling, een verrijdbare of een vliegende (satelliet of vliegtuig) worden uitgevoerd. Sommige systemen gebruiken het teruggekaatste zonlicht als informatiebron, andere bevatten zelf een bron die het te bestuderen object bestraalt met licht van zorgvuldig gekozen golflengten, zodat de begeerde gegevens inderdaad verkregen worden. Voor het aftasten van een groot

gebied gebruikt men tegenwoordig rijen van detectoren die loodrecht geplaatst worden op de bewegingsrichting van de satelliet of het vliegtuig waarin het waarnemingssysteem zich bevindt. Door het beschikbaar komen van meer gecompliceerde elektro-optische detectiecellen kunnen thans eenvoudiger, dus betrouwbaarder, optische systemen worden toegepast. Een voorbeeld is het instrument dat momenteel door de TPD in samenwerking met het NLR wordt ontwikkeld voor waarneming, vanuit een vliegtuig, van gewassen op het land of van stoffen onder of aan het zeeoppervlak.

Dankzij de activiteiten van Nederlandse astronomen zijn bij de TPD een flink aantal instrumenten voor metingen vanuit een ruimtevoertuig ontworpen en vervaardigd.

Het aanpassen van de technologie aan de nieuwe materialen voor de thans in opkomst zijnde geïntegreerde optische elementen zal in de nabije toekomst veel van de aandacht vragen.

Meetsystemen

Als voorbeelden van klassieke optische meetsystemen kunnen genoemd worden afstandsmeetkunde (zoals gebruikt in de landmeetkunde), dikte- en verplaatsingsmeters (doorgaans op interferentie berustend en bestemd voor het meten van zeer dunne lagen of zeer kleine verplaatsingen, in de orde van micrometers of minder) en uitlijnapparatuur (voor het zeer nauwkeurig positioneren van onderdelen in een grote constructie). Kenmerkend, en dat is de grote kracht van zulke meetmethoden, is dat er contactloos wordt gewerkt, zodat de te meten grootte doorgaans niet, of minimaal, wordt beïnvloed.

Met de moderne meetsystemen, die dank zij de laser veel meer mogelijkheden bieden, zijn de voorgaande grootheden nauwkeuriger, en in grotere meetgebieden te bepalen en worden ook andere grootheden, zoals spanningstoestanden, temperaturen en trillingspatronen, min of meer direct gemeten. Daarbij wordt geleidelijk aan de visuele bepaling van het meetresultaat vervangen door een meer geautomatiseerde, elektronische detectie en verwerking. Dit laatste impliceert meer dan eenvoudigweg een opvoeren van de snelheid waarmee gegevens ter beschikking worden gebracht. Door digitale beeldbewerking en patroonherkenning kan men optische signalen, die met een televisiecamera of een rooster van detectoren in een rekenmachine-geheugen zijn gebracht, ook wezenlijk verbeteren alvorens er conclusies uit te trekken.

Dit omvat met name het verwijderen van ruis (vanuit een laser belichte voorwerpen zien er, door de eigenschappen van dat licht, altijd gespikkeld uit), het scherper maken van randen, het in rekening brengen van voor de meting niet-essentiële schaduwen en onregelmatigheden in de lichtverdeling en zelfs het aanbrengen van gewenste interferentielijnen die ergens in het systeem per ongeluk zijn zoekgeraakt. Hiervoor is in de Afdeling der Technische Natuurkunde van de TH een groot aantal algoritmen en programma's ontwikkeld. Daarnaast zal het onderzoek naar optische verbeteringen en zuiver optische rekensystemen de mogelijkheden in de toekomst kunnen vergroten. Deze meettechnieken zullen in de toekomst ook kunnen worden toegepast bij de 'flexibele automatisering', waarbij een integratie van optische en andere fysische technieken, veelal gecombineerd in robots, tot nieuwe produktiemethoden moeten leiden. Het huidige toepassingsgebied van optische meetmethoden is uitzonderlijk breed; ook de geneeskunde, satellietgeodesie, kristallografie, warmtetransport-

studies en chemische apparaatbouw gebruiken ze. Vele ervan zijn gebaseerd op interferentie van licht, dat wil zeggen de eigenschap dat twee lichtbundels die ergens gelijktijdig optreden, te zamen een lichtverdeling geven in de vorm van lichte en donkere vlakken, waarbij dit patroon kenmerkend is voor het verschil (in richting en fase) tussen deze bundels. Als men aldaar een scherm plaatst (bijvoorbeeld een fotografische film of het gevoelig oppervlak van een detector) ziet men hierop een patroon van interferentielijnen.

Voorwaarde is dan wel dat deze bundels dezelfde frequentie en een vast faseverband hebben (coherent zijn), een eis waaraan kan worden voldaan door beide bundels aan dezelfde laser te onttelen. Metingen geschieden nu door op een van de bundels informatie over de te meten grootheid te enten, terwijl de andere als vaste referentiebundel dienst doet. Het patroon van interferentielijnen bevat dan ook de gezochte informatie, zij het vaak in een moeilijk terug te vinden vorm.

Een belangrijke techniek voor deze vorm van meten maakt gebruik van *hologrammen*. Uit zo'n hologram is een lichtbundel te verkrijgen die alle informatie bevat over het voorwerp dat erop is vastgelegd, in tegenstelling tot bijvoorbeeld een dia waarop het driedimensionaal-zijn van een voorwerp altijd verloren is gegaan. Twee zulke holografische lichtbundels, van een voorwerp in twee verschillende toestanden (bijvoorbeeld onvervormd en vervormd) geven bij interfereren een patroon waaruit de vervorming is te bepalen. Op deze wijze kunnen afwijkingen in de orde van $1\text{--}500\text{ }\mu\text{m}$ bepaald worden, zolang met een nauwkeurigheid van enkele procenten. Snel wisselende verschijnselen, zoals trillingen, zijn op dezelfde wijze te bestuderen indien men gebruik maakt van lasers die zeer kortdurende lichtpulsen (50 ns of minder) afgeven. Deze interferentie-holografie is een vorm van niet-destructief onderzoek die

reeds zijn weg naar industriële toepassingen gevonden heeft.

Scheuren

Een voorbeeld is de bij de TPD ontwikkelde meting van de groei van vermoeiingsscheuren onder de kop van een bout in de vleugelonderhuid van een vliegtuig. Het gaat er hierbij om de optredende scheur te detecteren voordat deze zijn kritische lengte heeft bereikt, wat meestal inhoudt dat detectie mogelijk moet zijn voordat de scheur het metaaloppervlak bereikt. Bij inleidende metingen aan een proefstuk, ingespannen in een vermoeiingsmachine, is met succes gebruik gemaakt van een robijn pulslaser en een constructie waarbij het hologram op het voorwerp wordt bevestigd. Tussen de twee belichtingen wordt de mechanische belasting op het proefstuk vergroot, waardoor de huid vervormt. Bij aanwezigheid van een scheur in het boutgat zal deze vervorming lokaal afwijken, wat zichtbaar gemaakt kan worden in het interferentiepatroon.

Een algemeen nadeel van holo-

grafische technieken is dat niet alleen voor de opname, maar ook bij de weergave (dus als het patroon wordt gevormd) laserlicht noodzakelijk is. Het ontwikkelen van speciale opnametechnieken die bij weergave het gebruik van wit licht (gloeilamp, zon) toestaan, betekende een belangrijke stap voor de uitbouw van de bovenstaande testmethode tot een volwaardig detectiesysteem. Soortgelijke wit-licht hologrammen worden verder gebruikt als onderdeel van waardepapieren en legitimatiebewijzen om te dienen als een kenmerk van echtheid.

Een voorbeeld van het gebruik van (interferentie) holografie in wetenschappelijk onderzoek is de studie, bij de Vakgroep Optica, van de groei van (metaal)-kristallen tijdens gietprocessen. Daarbij worden met behulp van pulslasers enkele zowel als dubbele opnamen gemaakt van de kristallen die in een verantwoord gekozen doorzichtige modelvloeistof groeien. Zowel uit de deeltjesstatistiek in de normale

hologrammen, als uit de deeltjes-groei die uit de interferentiehologrammen blijkt, kan men afleiden hoe het gietproces moet verlopen om een gewenste materiaalstructuur te verkrijgen.

Een andere op interferometrie berustende methode is de *Laser-Doppler Snelheidsmeting* (LDS). Hiermee kan men contactloos de snelheid van stromende vloeistoffen of gasen bepalen. Het principe ervan is, dat als men met twee laserbundels weer een (regelmatig) interferentiepatroon opwekt, de vloeistof of gasdeeltjes die dit patroon doorlopen afwisselend wel of geen licht verstrooien omdat zij zich in een licht of een donker deel van het patroon bevinden. De frequentie waarmee dit verstrooide licht aan- en uitgaat is een functie van de grootte en richting van de deeltjessnelheid. Studies inzake dit onderwerp hebben in Delft onder meer geleid tot de ontwikkeling, bij de TPD, van commerciële LDS-meetapparatuur. Gezien de sterk uiteenlopende toepas-

singsgebieden, heeft men daarbij bijzondere aandacht moeten wijden aan de flexibiliteit van het systeem. Naast veel toepassingen in de fysische technologie, studies van gasstromen in verbrandingsmotoren en snelheidsmetingen aan bloed noemen wij het meten van de volgstroom achter schepen en tussen schroef en schip.

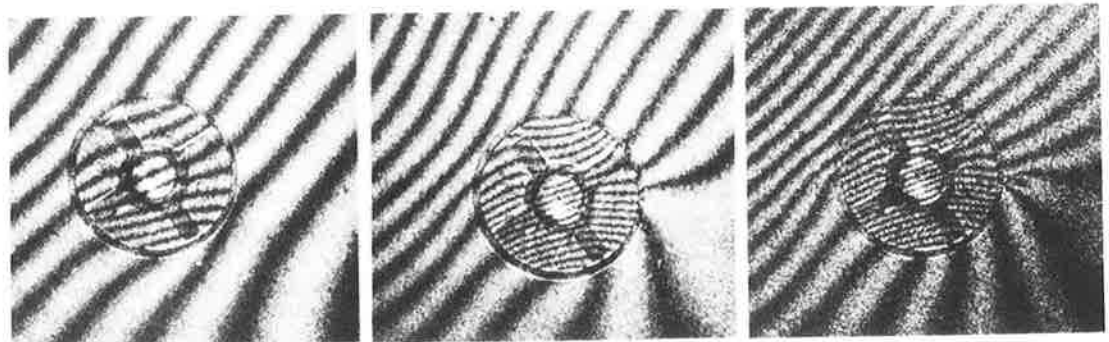
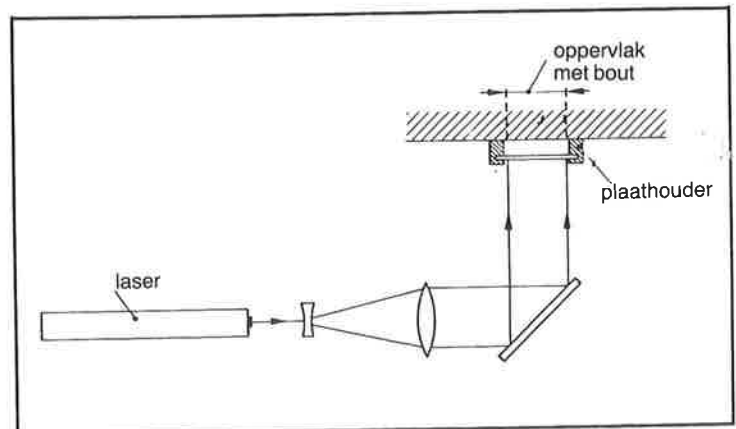
De methode die thans gelijktijdig informatie over meer snelheidscomponenten kan geven, is ook bruikbaar om snelheden van bewegende (trillende) voorwerpen te bepalen. Door deze methode continu uit te voeren en de snelheid over een bepaald tijdinterval te integreren, kan men verplaatsingen bepalen. De industrie heeft voor deze toepassing belangstelling getoond, onder andere voor het meten van kabel- en pijplengten tijdens de productie.

Lichtpuls

Een afstandsmeting die niet op interferentie berust, is gebaseerd op het meten van de looptijd van lichtpuls. In de geode-

Uit het oogpunt van veiligheid is het van groot belang scheuren, die kunnen optreden onder bouten in de vleugelonderhuid van een vliegtuig, te detecteren voordat de scheur het oppervlak bereikt en kritisch wordt voor de sterkte van de huid. Hiervoor is een eenvoudige en gevoelige holografische opzet ontwikkeld, die in figuur A schematisch is weergegeven en waarmee proeven zijn uitgevoerd aan een proefstuk van een vliegtuigvleugel in de testfaciliteit op het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium. Dit proefstuk werd onderworpen aan een vergelijkbare vermoeiing. Een dubbel belicht hologram wordt opgenomen, waarbij tussen beide opnamen de trekspanning in het proefstuk wordt verhoogd. Om de invloed van bewegingen van het voorwerp ten opzichte van het hologram tijdens de opnamen te minimaliseren, is een speciale plaathouder voor het hologram ontwikkeld, die magnetisch op het te onderzoeken voorwerp wordt vastgeklemd. Verder is gekozen voor toepassing van een robijnlaser met een pulsduur van 25 ns en een pulsenergie van 30 mJ en is de plaathouder voorzien van een sluit. Met deze opstelling kunnen hologrammen worden opgenomen bij volledig daglicht en zonder dat bewegingen van het voorwerp tijdens de opname

van het hologram het resultaat van het onderzoek ongunstig beïnvloeden. Het vervormingspatroon, veroorzaakt door het verschil in trekspanning tussen beide opnamen, wordt zichtbaar als interferentiepatroon op het voorwerp, na reconstructie van het hologram. Een drietal voorbeelden hiervan zijn weergegeven in de interferogrammen van figuur B. In het eerste interferogram is de huid nog gaaf. In de andere twee interferogrammen ziet men achtereenvolgens rechts en later ook links van de kop van de bout steeds sterkere afwijkingen, die duiden op een toenemende lengte van de scheur in het boutgat.



sie wordt dit de laatste jaren toegepast om zeer nauwkeurig de afstand te bepalen tussen speciaal hiervoor bestemde satellieten en verschillende plaatsen op aarde. Het doel van dit internationale meetnet is om geodynamische verschijnselen als de aardrotatie, de aardgetijden en de aardschollenbeweging te bestuderen. Ook fluctuaties in het zwaartekrachtveld van de aarde kan met op deze wijze meten.

In het grondstation zendt een laser lichtpulsen uit met een groot vermogen, maar een zeer korte duur. Op de satelliet bevindt zich een reflector die de puls naar het grondstation weerkaatst. De pulsduur bepaalt de lengte van de uitgezonden 'lichtpijp' en daarmee in grote mate de meetnauwkeurigheid. De terugkerende lichtpuls is 10^{11} tot 10^{16} keer zwakker dan de uitgezonden puls, wat speciale detectietechnieken noodzakelijk maakt.

De eerste in Delft ontwikkelde laserafstandsmeter staat opgesteld in het Observatorium te Kootwijk, waar een robijnlaser

pulsen afgeeft met een duur van 4 ns, een piekvermogen van ca. 1000 MW (Delft verbruikt 100 MW aan elektriciteit in de winterspits) en een repetitiefrequentie van 15 pulsen per minuut. Hiermee is een nauwkeurigheid van ca. 15 cm in de afstand tot de satelliet bereikt. Het systeem is inmiddels verder ontwikkeld tot een verplaatsbaar apparaat (gemonteerd in een vrachtwagen) waarvoor internationaal grote belangstelling bestaat.

De ontwikkeling van inspectiesystemen is een belangrijk aandachtsgedebiet bij de TPD. In de industrie moeten visuele inspectiemethoden steeds meer plaats maken voor automatische methoden. Dit wordt vooral veroorzaakt doordat een objectieve inspectie wordt vereist, een groter aantal producten moet worden geïnspecteerd en het productieproces snel moet kunnen worden bijgesteld.

Een belangrijk voorbeeld hiervan is de ontwikkeling van inspectiesystemen voor bankbiljetten, waarbij zowel het detecteren van

te zeer vervuilde als van vervalste biljetten wordt nagestreefd.

Dunne lagen/golfgeleiders

Reeds in 1817 merkte Fraunhofer op dat de reflecterende eigenschappen van oppervlakken te veranderen zijn door een dunne buitenste laag ervan te etsen. Ten tijde van de ontdekking ging het aanvankelijk om verwerking, die vooral ook de doorlating van licht nadelig beïnvloedde. Pas in de 20-ste eeuw ging men in een meer gericht onderzoek proberen, met behulp van speciaal aangebrachte lagen de doorlating of reflectie, al naar gelang de toepassing, met opzet te vergroten of verkleinen.

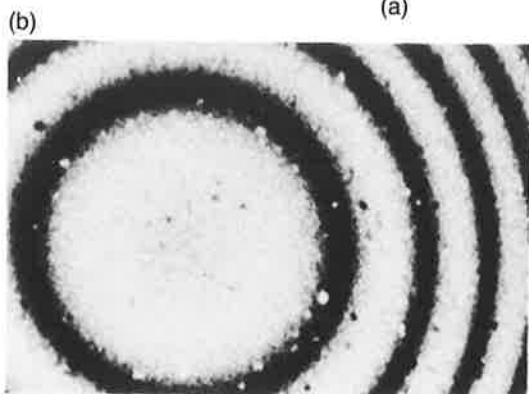
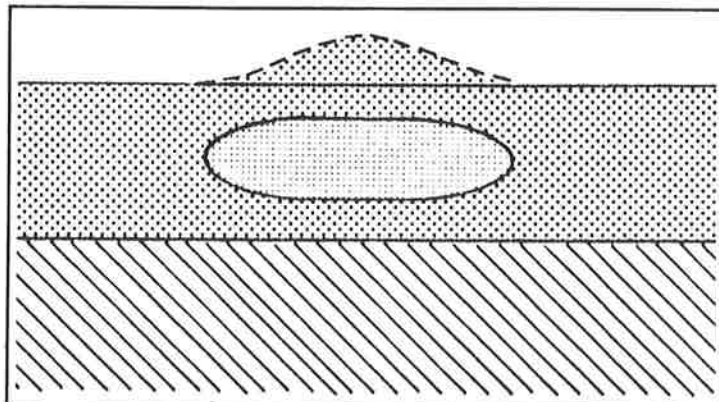
Belangrijke stappen om dit tot stand te brengen waren de ontwikkeling van de vacuümdepositie in de jaren dertig, waarbij in een omgeving van hoogvacuüm (10^{-5} – 10^{-7} torr) deeltjes van een chemisch zuivere stof op het te bedampen oppervlak neerslaan, en het idee om de effecten tot stand te brengen met pakketten van meer lagen op elkaar, elk van een stof die in optische eigen-

schappen van de naburen verschilt. Ofschoon uitzonderingen regelmatig voorkomen, mag toch worden gesteld dat voor optische doeleinden speciaal zuivere metalen (aluminium, zilver en goud, voor spiegels) en diëlektrische verbindingen (ZnS, PbS, MgF maar ook SiO_2 en TiO_2 , voor antireflex pakketten en voor deelspiegels en kleurfilters) toepassing vinden. De werking van dergelijke pakketten van diëlektrische materialen berust op interferentie van de verschillende bijdragen die ontstaan doordat aan ieder scheidingsoppervlak tussen twee lagen licht wordt weerkaatst of doorgelaten; de mate van deze weerkaatsing is te regelen door keuze van de brekingsindices en de dispersie, dus door materiaalkeuze. Omdat tevens het aantal en de dikten van de lagen van zo'n pakket nog te kiezen valt, zijn aldus veel effecten te verwezenlijken.

De ontwikkeling van de theorie hieromtrent heeft nog steeds niet tot een algemeen toepasbaar ontwerpsysteem geleid. Het ontwerpen, zowel als de technologie

Blaren, vacuolen en kleine onthechtingen in verfsystemen kunnen met microscopische inspectie vaak niet gedetecteerd worden. Deze 'defecten' in verfsystemen kunnen in een atmosfeer milieu echter uitgroeien tot grote onthechtingen, waardoor het verfsysteem zijn functie als beschermingslaag van het onderliggende substraat verliest. Om deze defecten reeds in een vroeg stadium te detecteren is een holografische testmethode ontwikkeld. In figuur a is het principe hiervan weergegeven. Het defect is een holte in het verfsysteem met een bepaalde inwendige hygroscopische druk. We maken nu een eerste holografische opname van dit systeem. Vervolgens wordt de luchtdruk in de omgeving van het verfsysteem verlaagd, zodat het defect onder invloed van de inwendige druk elastisch of visco-elastisch uitzet. Dit is in figuur a met een stippellijn aangegeven. De tweede holografische opname kan dan na enige tijd gemaakt worden zodat men een dubbelbelicht hologram krijgt. Bij reconstructie van dit hologram zal men beide toestanden van het oppervlak gelijktijdig waarnemen, waarbij het verschil in de toestanden, de 'vervorming', zichtbaar wordt in de vorm van een interferentiepatroon. Enkele voorbeelden hiervan zijn gegeven in figuur b en c. Het regelmatige circu-

laire patroon wordt veroorzaakt door doorbuiging van het substraat. De kleine puntvormige afwijkingen van dit patroon ('witte of zwarte stippen') worden veroorzaakt door blaren en vacuolen (diameter 0,1 mm). In figuur c zijn veranderingen in kromming aanwezig van de interferentielijnen. Dit wijst op kleine onthechtingen (diameter ongeveer 1 mm). Met deze holografische methoden kan men de plaats en afmeting van een defect alsmede het aantal defecten bepalen.



van het aanbrengen van de lagen en van het verkrijgen van lagen van de vereiste chemische samenstelling (zuiverheid, mate van geoxydeerd-zijn) vormen de hoofdproblemen in dit vakgebied. In de vakgroep Optica wordt veel aandacht besteed aan de technologie van het bedampen met nieuwe stoffen, waardoor de verwezenlijking van pakketten die aan ingewikkelde eisen voldoen, mogelijk is geworden. Daarnaast heeft het onderzoek zich de laatste jaren vooral ook op het ontwerpen gericht.

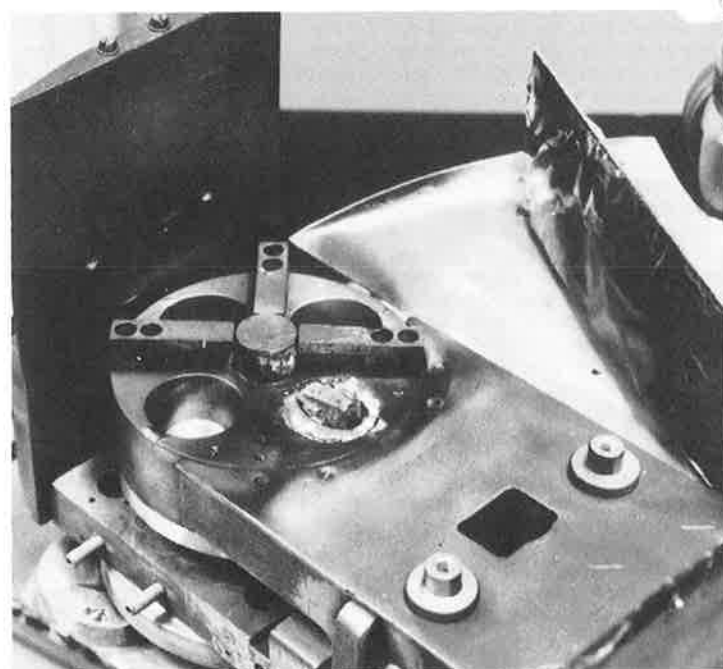
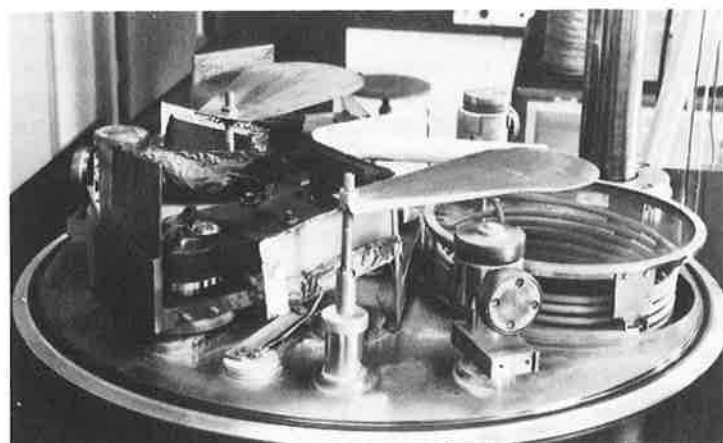
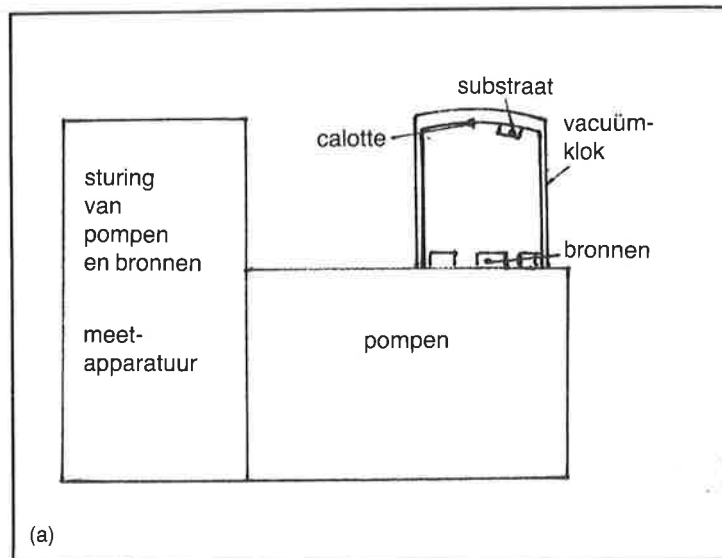
Een nieuw aspect is dat, door de veel stringenter eisen die aan het eindresultaat worden gesteld, het aantal lagen binnen een pakket sterk toeneemt. Tegenover aantallen lagen van één tot vijf voor de pakketten zoals die op de meeste optische componenten te vinden zijn, vereisen moderne laserspiegels en kleurfilters veel dikkere pakketten. Waar deze thans nog met twintig à dertig lagen aan de eisen kunnen voldoen, is te voorzien dat in de naaste toekomst ook pakketten van veertig tot meer dan honderd lagen benodigd zullen zijn. Teneinde dit uit te voeren wordt thans gewerkt aan een automatiseren van het opdampproces, met daaraan gekoppeld een rekenprogramma dat de dikte van volgende lagen aanpast als een juist geproduceerde laag niet in overeenstemming is met het ontwerp, zodat het eindresultaat binnen de gestelde toleranties aan de eisen blijft voldoen.

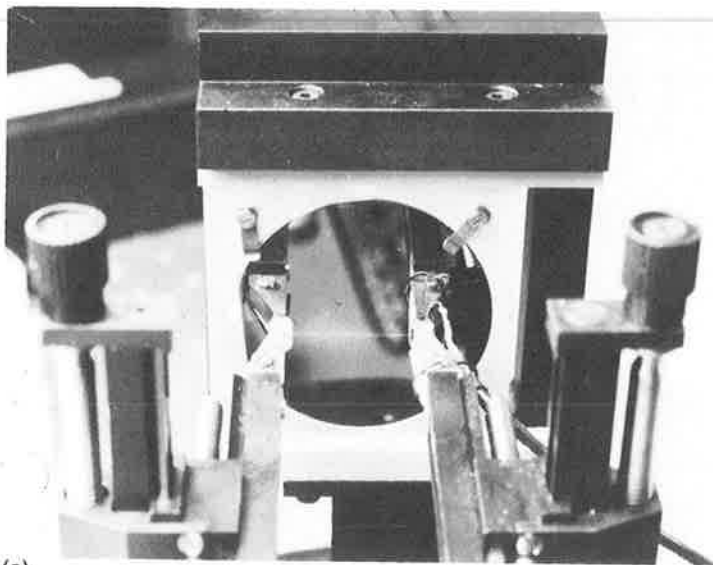
Veel aandacht

Het aanpassen van de technologie aan de nieuwe materialen voor de thans in opkomst zijnde geïntegreerde optische elementen zal in de nabije toekomst veel van de aandacht vragen. Deze ontwikkeling zal in Delft zowel binnen de TH-vakgroep Optica als voor de TPD Hoofdafdeling Optische Instrumentatie in de komende jaren van grote betekenis worden. Het behelst een techniek om licht voort te laten planten en te beïnvloeden die direct aansluit op het gebruik van de golfgeleiders zoals die al een

Het opdampen van dunne lagen. Het te bedampen voorwerp (substraat) hangt, met het vlak waarop de laag wordt aangebracht omlaag, in een rek (calotte) bovenin de vacuüm klok (zie schema (a)). Om gelijkmatiger verdeling van het materiaal te verkrijgen kan de calotte ronddraaien. Op de bodem van de klok staan bronnen waaruit het op te dampen materiaal via verhitting (elektrische stroom door schuifjes) of door een elektronenstraal (uit een elektronenkanon) in dampvorm in de klok wordt verspreid. Een deel ervan slaat neer op het substraat. Met gevoelige meetapparatuur kan de laagdikte veelal in de orde van 10^{-7} m nauwkeurig worden vastgesteld. Bij de juiste dikte wordt de bron door een draaibaar scherm (voorgrond foto (b)) afgesloten en kan een andere bron worden ingeschakeld voor de volgende laag. Foto (b) toont verder afzuig- en koelinstallaties voor het verzorgen van het vacuüm (10^{-6} à $5 \cdot 10^{-7}$ torr) en rollen om de (weggenomen) calotte te doen draaien. Foto (c) toont een elektronenkanon met vier voorraadbakjes.

kleine vijftig jaar voor bijvoorbeeld radargolven in zwang zijn. Reeds aan het einde van de vorige eeuw voorspelde Lord Rayleigh dat het mogelijk moest zijn om de, toen net ontdekte, elektromagnetische golven (waartoe ook zichtbaar licht behoort) in of langs cilindrische structuren zoals pijpen voort te laten planten. De metalen golfpijpen, om golven 'op te sluiten en voort te geleiden' bleken voor frequenties rond 10^{10} Hz uitstekend te voldoen. Deze pijpen werken als 'bovendoorlatend' filter in de zin dat zij, bij gegeven dwarsafmetingen, eerst boven een daarmee samenhangende frequentie voor de golven een geleider in de langsrichting vormen. Als de frequentie boven deze 'afsnijfrequentie' toeneemt, stijgt het aantal patronen (modi) dat door de pijp gaat snel, en elke modus heeft een eigen voortplantingssnelheid. Dit laatste is in feite een groot nadeel: omdat ter plaatse van een onregelmatigheid (bocht, hoek, koppeling, splitsing) in de pijp uit één enkele invallende modus zeer veel andere modi ontstaan, die zich elk met een eigen snelheid voortplanten, worden pulsformige signalen in





(a)

Geïntegreerde optica. Licht kan zich voortplanten door een dunne diëlektrische laag die op een ondergrond van glas of silicium is aangebracht. De foto's tonen het voortplanten van een smalle laserbundel, gevangen in een Al_2O_3 -laag op een ondergrond van silicium (foto (a)) en van glas (foto (b)). Het licht wordt aan de linkerzijde met behulp van een klein prisma ingekoppeld, aan de rechterzijde is een uitkoppelprisma aangebracht waarmee, via een fotocel, de

lichtintensiteit (en daarmee de demping) kan worden gemeten (in de betrokken gevallen enkele dB per cm). Indien de plak niet egaal bedampt wordt, maar met kanaalvormige structuren, kan men bijvoorbeeld elektro-optische modulatoren, multiplexers en demultiplexers (maar ook sensoren) maken. Toekomstige ontwikkelingen zijn erop gericht dat ook bronnen (lasers) en detectoren in zo'n plak geïntegreerd worden.

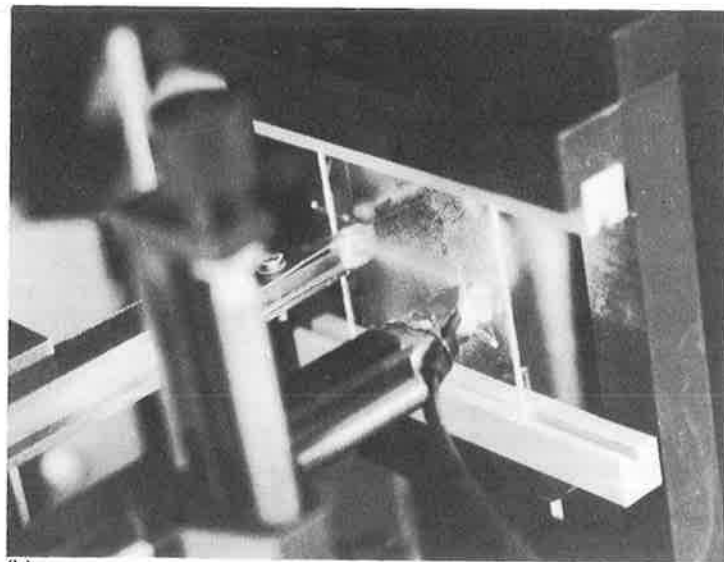
golfpijpsystemen al gauw gevormd. Om dit tegen te gaan moet men de dwarsafmetingen van de pijp aan de te gebruiken frequentie aanpassen, zodat slechts één modus door de pijp (single mode operation).

Toen men aan het eind van de jaren veertig, onder andere in Delft, zulke systemen ook voor zichtbaar licht ging bestuderen, was het duidelijk dat zo'n metaal 'single mode' pijp onaanvaardbaar dun zou moeten worden. Een meer belovend systeem werd gevonden in de vorm van glasvezels, die door hun van de omgeving (lucht, maar liever nog een mantel van ander diëlektrisch materiaal) verschillende brekingsindex de golven ook goed in hun kern geconcentreerd kunnen houden, waardoor weer een golfgeleider ontstaat. Een zeer smalle glaskern kan weer tot single-mode operation, met gunstige voortplantingseigenschappen voor op het licht gemoduleerde signalen, leiden. Breder kerne

en te koppelen, maar werken in veel modi (multi-mode) en zullen daardoor na betrekkelijk korte voortplantingsafstanden een herstel van de pulsform veriezen, teneinde de informatie niet verloren te doen gaan.

Glasvezels

De technologie van glasvezels is in het afgelopen decennium zeer sterk ontwikkeld, vooral ten aanzien van het verminderen van de demping en van het koppelen van de einden aan bronnen en detectoren. Dit heeft geleid tot bruikbare glasvezels voor informatie-overdracht, en heeft tevens de ontwikkeling van allerlei opnemers (van druk of temperatuur) opgebouwd uit glasvezels, de zogenaamde *glasvezel sensoren*, sterk gestimuleerd. Deze zijn ongevoelig voor elektromagnetische stoorvelden en het signaal van de sensor kan over grote afstanden worden overgebracht. Bij de TPD is, met steun van het Delftse Centrum voor Micro-Elektronica, een druksensor



(b)

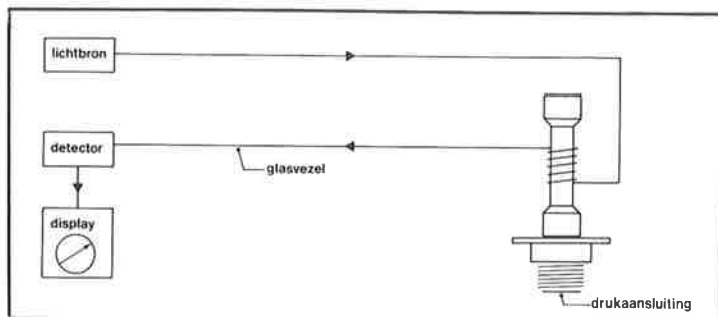
ontwikkeld waarbij het sensorge-deelte bestaat uit een speciaal gevormd metaal buisje waarop een tiental windingen van de glasvezel is gewikkeld. Het buisje is aan één kant gesloten, terwijl aan de andere kant de te meten druk wordt aangebracht. Door de druk wordt het buisje en de hierop gewikkelde glasvezel vervormd, waardoor de transmissie door de

glasvezel varieert; dit wordt met een detector aan het ene uiteinde van de glasvezel waargenomen. Een dergelijke sensor, waarvoor van de zijde van de industrie reeds belangstelling bestaat is geschikt voor zowel statische als dynamische metingen. Verwacht wordt dat deze ontwikkeling de komende jaren veel aandacht zal vragen. Verder wordt

Glasvezelsensoren

Sensoren op basis van glasvezel komen steeds meer in de belangstelling omdat ze een aantal voordelen bezitten als intrinsiek veilig en ongevoelig voor elektromagnetische stoorvelden, terwijl transport van signalen over grote afstanden mogelijk is. Grootheden die gemeten kunnen worden met glasvezelsensoren zijn voorbeeld: spanning, druk, rek, verplaatsing, debiet, temperatuur, elektrische- en magnetische grootheden. Met steun van het Delftse Centrum voor Micro-elektronica is een drukmeter ontwikkeld voor industriële toepassingen. Het principe van deze glasvezel druksensor is in de figuur weergegeven. De ontwikkelde glasvezel druksensor bestaat uit

een buisje (typische maten $\varnothing 12$ mm, lengte 50 mm) waarop een tiental windingen glasvezel (buitendiameter 125 μ m) is gewikkeld. Het buisje is aan één kant gesloten. Aan de andere kant wordt de druk aangebracht, waardoor het buisje en de glasvezel vervormen. Vervorming van de glasvezel heeft een vergroting van de demping van het licht tot gevolg; er wordt dus minder licht op de detector geworpen, die daardoor een kleiner elektrisch signaal afgeeft. De sensor bevat geen bewegende delen en kan op een eenvoudige manier worden geproduceerd. Het meetprincipe biedt de mogelijkheid om op basis ervan sensoren te ontwikkelen die een groot meetgebied bestrijken.



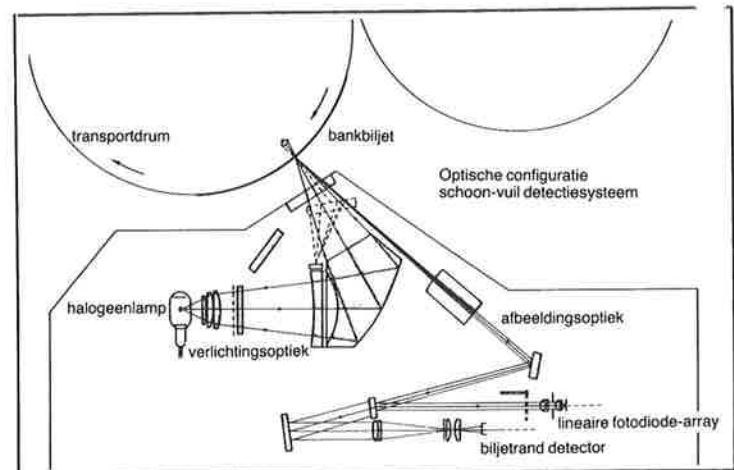
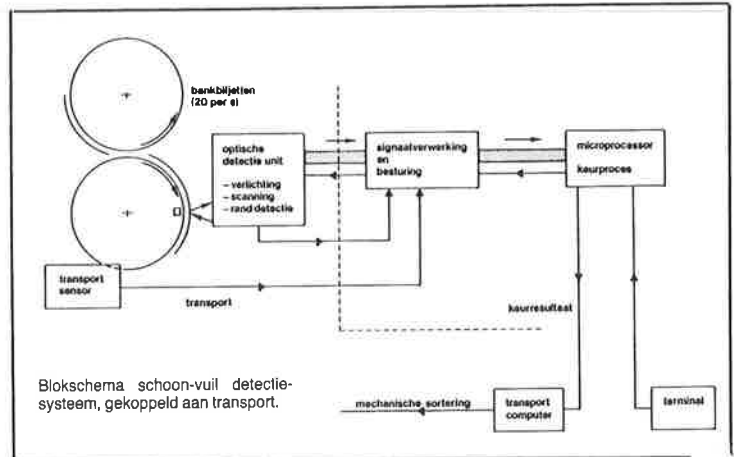
gewerkt aan de ontwikkeling van een hydrofoon, waarmee onder water geluidsgolven kunnen worden gedetecteerd.

Een belangrijke eis hierbij is, dat de gevoeligheid voor drukvariaties zeer groot is, wat hoge eisen stelt aan het ontwerp en de uitvoeringsvorm van de glasvezel sensor. Bij het ontwerp wordt uitgegaan van een interferometeropzet. Een andere toepassing van glasvezels is hun gebruik bij het bewaken van de conditie van grote constructies. Hiermee kan het optreden van lokale breuken, scheuren en spanningsconcentraties, bijvoorbeeld in off-shore installaties, worden vastgesteld. Golfgeleiders voor licht zijn ook nog anders te maken, bijvoorbeeld als uiterst dunne lagen diëlektrisch materiaal op een diëlektrische ondergrond (het *substraat*, bijv. van glas of kwarts). Door tijdens het opdampen maskers te gebruiken zijn aldus ook smalle kanalen, min of meer gelijkend op de kern van een glasvezel, op zo'n substraat te produceren.

Optische inspectiemethoden voor waardepapieren behoren sinds 1968 tot het werkterrein van de TPD. Een recent voorbeeld is de ontwikkeling van een geavanceerd schoon-vuil detectiesysteem voor bankbiljetten ten behoeve van De Nederlandse Bank. Hierbij wordt gekeurd op effecten, veroorzaakt door de circulatie als: vervuiling, kreukels, gaten en scheuren, cellotape, ezelsoren en lokale afwijkingen zoals schrift. De schoon-vuil keuring is gebaseerd op meting van de optische reflectie van het biljetoppervlak, dat wordt verlicht en afgebeeld op een solid-state fotodiode array, tijdens het passeren van het biljet op de transportmachine. Het biljet wordt op deze wijze gescand in oppervlak-elementen van 2×2 mm. De fotodiode-array signalen worden gedigitaliseerd en volgens bepaalde algoritmen verwerkt in een micro-processor. Per seconde worden 20 bankbiljetten geïnspecteerd.

Soortgelijke kanalen zijn met dergelijke maskers ook via ets-technieken in fotoresistlagen op glas, halfgeleiders of andere materialen te produceren. Het is op deze wijze mogelijk om elektronisch gestuurde modulatoren voor licht te maken. Het vakgebied, zowel als de produkten, staan thans bekend als *geïntegreerde optica*.

Met gekoppelde kanalen is het stapelen en het ontrafelen van lichtverbindingen (multiplexing, demultiplexing) mogelijk. Een verder ideaal is het integreren van een laser, modulatoren, multiplexers en dergelijke op een enkel plakje (bijvoorbeeld halfgeleidermateriaal), die dan door de grote onderlinge gelijkenis met grote efficiëntie aan glasvezels te koppelen zijn. Dergelijke stelsels zullen niet slechts in de telefoonverbindingen van de toekomst gaan voorkomen, maar ook in sensorsystemen voor druk, temperatuur en andere fysische grootheden. De kleine afmetingen ervan en de koppeling aan de buitenwereld met glasvezels maken toepassing in veel gebieden mogelijk, zoals bij medisch onderzoek en in de industrie. Met het oog hierop zijn in samenwerking met de deelgroep



voor de Techniek van Glasvezelcommunicatie van de Afdeling der Elektrotechniek, projecten gestart die enerzijds ten doel hebben de benodigde technologieën in huis te brengen en anderzijds ervaring moeten verschaffen in het ontwerpen van zulke systemen.

Daarbij wordt nauw aangesloten bij de reeds aanwezige ervaring in het vervaardigen van dunne lagenpakketten en in de fotoresistverwerking, ondermeer in het IC-atelier van de Afdeling der Elektrotechniek. Van groot belang zijn ook de in het Centrum voor Submicrontechnologie aanwezige faciliteiten voor het schrijven van patronen (bijv. in het maskermateriaal) en het analyseren van het materiaal met scanning electron microscopy (SEM).

Het gaat hierbij om kanalen van dwarsafmetingen in de orde van enkele microns, die met een zeer

grote nauwkeurigheid op elkaar moeten aansluiten, zeer gladde wanden moeten vertonen en grote maatnauwkeurigheid moeten hebben. De vorm ervan zal, zeker voor sensoren, ingewikkeld kunnen zijn en grote technologische moeilijkheden opwerpen. Bij het koppelen met glasvezels, zowel als voor andere doeleinden in de geïntegreerde optica, spelen tralies een belangrijke rol; de met het huidige werk in de holografie opgedane kennis en ervaring inzake het fabriceren van zulke tralies zal daarbij een belangrijke inbreng betekenen. Aldus vormt de geïntegreerde optica in Delft voor de toekomst een logisch voortbouwen op de verschillende ontwikkelingen (ontwikkeling van afbeeldingsystemen, holografie, dunne lagenpakketten) zoals die in de afgelopen tien jaren hebben plaatsgevonden.

