

## Geïntegreerde optica voor sensoren en actuatoren

Dave Blank en Alfred Driessen

De afgelopen jaren heeft de toepassing van licht in de telecommunicatie-systemen, computers en sensoren een grote vlucht genomen. Zo heeft een optische component zoals de laser zijn weg gevonden in ons dagelijks gebruik en vindt veel informatietransport plaats door middel van lichtpuls door glasvezels. Onder andere bij dit transport en routeren zijn elektro-optische of opto-optische componenten nodig. Ook talloze sensortoepassingen zijn gebaseerd op het verschijnsel licht. Dit artikel geeft, naast de algemene fysische kenmerken van licht, enkele voorbeelden van mogelijke toepassingen van geïntegreerde optica in sensoren en actuatoren. Het artikel is hoofdzakelijk gebaseerd op gepubliceerd werk van dr. A. Driessen en dr. P.V. Lambeck van de vakgroep Transductie Techniek en Materiaalkunde van de Universiteit Twente en is in samenwerking met hen tot stand gekomen.

### Het verschijnsel licht

Voor het verklaren van de werking van geïntegreerde optica moeten we het verschijnsel licht nader beschouwen. In het begin van de achttiende eeuw was het Isaac Newton die beredeneerde dat licht zich gedroeg als ware het kleine deeltjes. Meer dan een eeuw later werd duidelijk dat deze kleine deeltjes geen massa en lading bezitten. Deze zogenoemde fotonen hebben een energie van enkele elektro-volt (eV). Op complementaire manier kan men licht beschrijven als elektro-magnetische golven  $E(\omega) = E_0 \sin(\omega t)$  met zeer hoge frequentie  $\omega = 5 \cdot 10^{14}$  Hz (500 THz) de intensiteit  $I$  van het licht is dan evenredig met  $E^2$ . De golflengte in vacum is daarbij in de grootte orde van micrometers. In figuur 1 staan de energie, frequentie en golflengte van een foton weergegeven.

Geïntegreerde optische componenten maken gebruik van deze zeer hoge frequenties, de uitstekende overdrachts- en lichtgeleidingseigenschappen van optische materialen en hebben kleine afmetingen in de orde grootte van de golf-

lengte van het licht. De lichtgeleidende glasvezel is een bekend voorbeeld. De glasvezel is een goedkope dunne vezel met een diameter van het optisch relevante deel van zo'n 5 tot 100 micrometer en laat over honderden kilometers transport van informatie toe. De demping ligt in het nabije infrarood lager dan 0,2 dB/km.

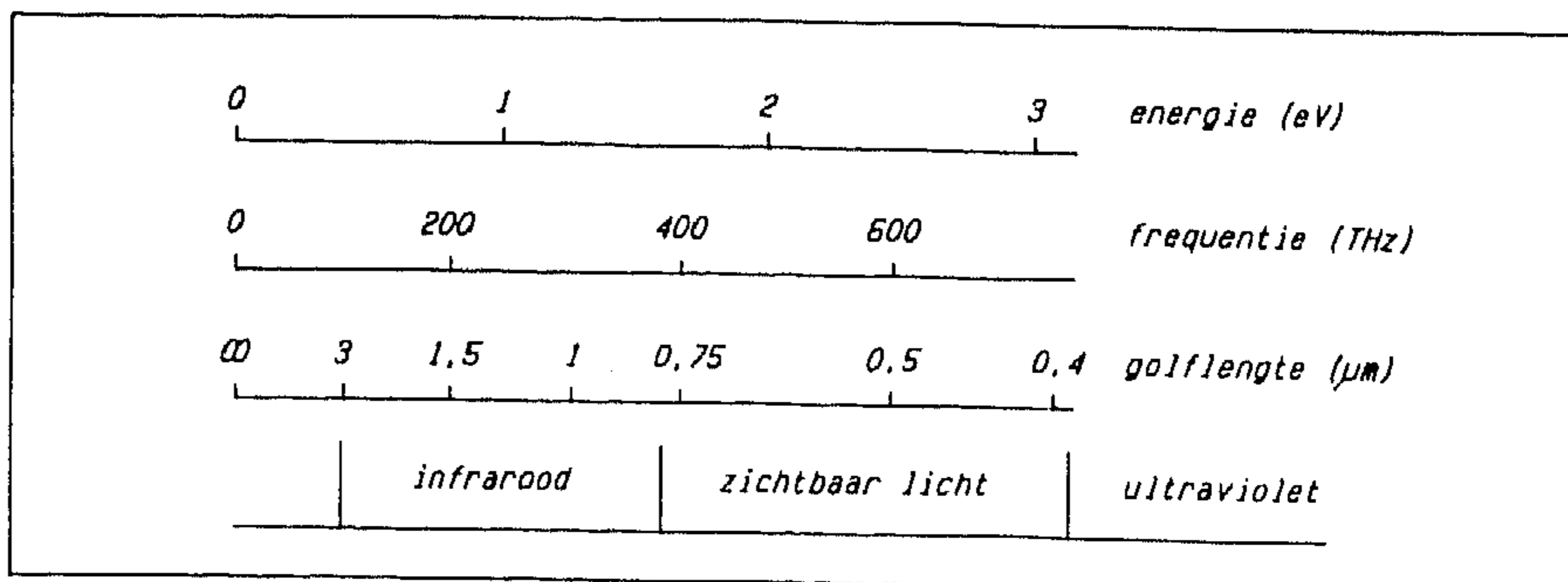
Voor telecommunicatie over lange afstand via optische glasvezels zijn sinds kort glasvezelversterkers commercieel beschikbaar die volledig optisch werken. In de praktijk wordt het signaal vanuit het elektrisch domein omgezet naar het optisch domein, vervolgens getransporteerd, waarna het signaal weer naar het elektrisch domein wordt omgezet, versterkt eventueel verdeeld om daarna weer als optische puls overgezonden te worden om uiteindelijk bij de eindgebruiker weer in het elektrisch domein te worden gebruikt. Het frequentiebereik van elektronische componenten is veel lager dan die van de mogelijke modulatie van het gebruikte licht (tot boven Tbit/sec). Boven enkele GHz wordt het steeds moeilijker en kostbaarder om betrouwbare elektronische schakelingen te realiseren. Ziehier het belang van optisch actieve elementen, die de volle bandbreedte van het optisch signaal kunnen verwerken. Voordat echter optisch actieve elementen op uitgebreide schaal toegepast kunnen worden, moeten vooral materiaalproblemen opgelost worden. Het soort materiaal dat hiervoor nodig is moet optisch niet-lineair zijn, dat wil zeggen zijn optische eigenschap-

pen dienen door licht beïnvloedbaar te zijn. Een voorbeeld van niet-lineair optisch materiaal zijn de varilux-brilleglazen die bij zonlicht donkerder worden. Hierbij is het effect groot, maar zeer traag. Men is juist op zoek naar materialen, waarvan de niet-lineariteit zowel groot als ook snel is.

Voor het vervaardigen van optische sensoren en actuatoren maakt men gebruik van optische glasvezels en/of planaire dunne-film technologie (optisch geïntegreerde schakelingen). Beide technieken zijn gebaseerd op vergelijkbare principes en zijn daarmee ook gedeeltelijk verwisselbaar. In tabel 1 staat een aantal voorbeelden van optische transducenten (sensoren en actuatoren) weergegeven. In dit artikel zullen we vooral de mogelijkheid van het toepassen van geïntegreerde optica dat wil zeggen planaire structuren bekijken.

### De geïntegreerde optica

In een geïntegreerd optisch circuit plant het licht zich voort in een lichtgeleider in de vorm van een kanaal niet groter dan enkele fm in doorsnede ( $f=10^{-15}$ ). Voor het maken van dergelijke geïntegreerde optische lichtgeleiders is een technologische infrastructuur nodig vergelijkbaar aan die voor de elektronische chiptechnologie. Binnen een stofarme ruimte wordt met behulp van depositietechnieken de gewenste meerlagenstructuur vervaardigd. Deze lagen worden met standaard submicrometer-lithografie en etsprocessen lateraal gestructureerd. De

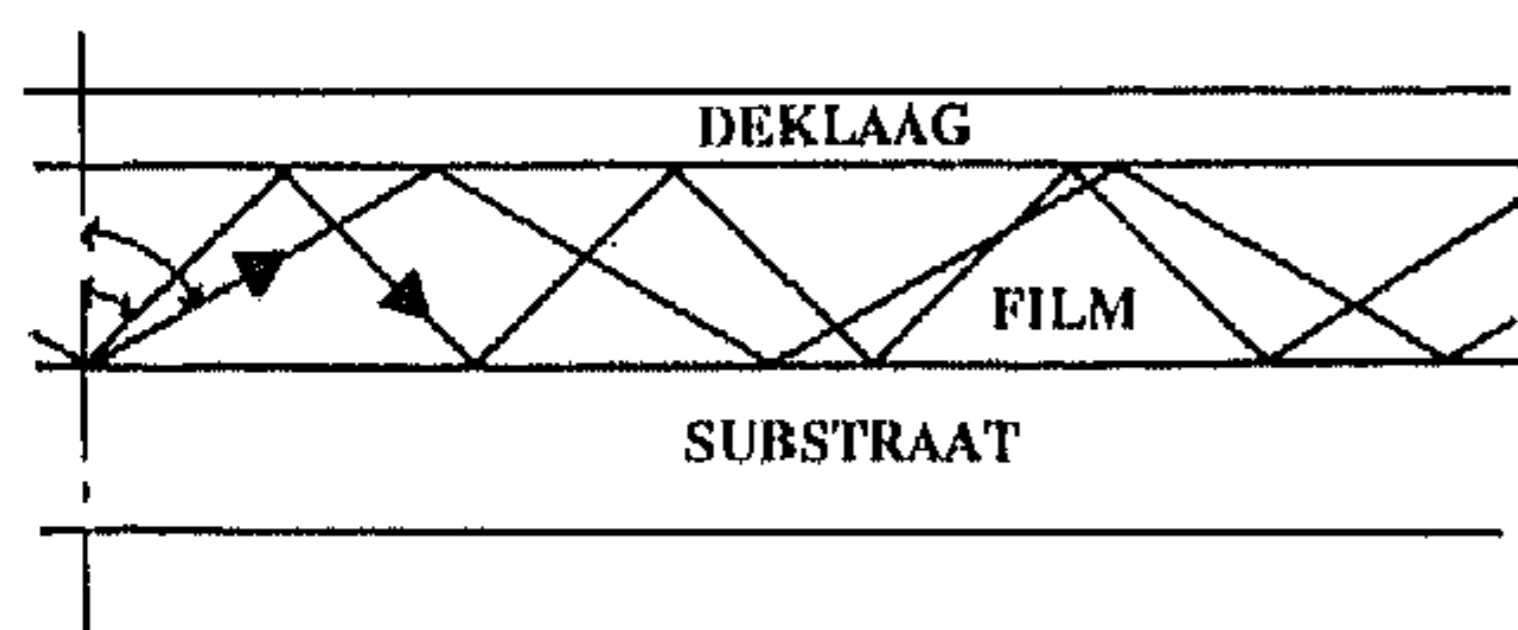


Figuur 1. Energie, frequentie en golflengte van een foton.

OPTISCHE TRANSDUCENTEN (sensoren en actuatoren)		
ingangsdomein	uitgangsdomein	voorbeelden
optisch	optisch	frequentieverdubelaar, logicapoort
elektrisch	optisch	laser, LED, modulator, luminiscentie-display
optisch	elektrisch	fotodiode, sensor
chemisch	optisch	sensor
optisch	chemisch	photochemische moleculaire devices
mechanisch	optisch	(micro)deflector, schakelaar
optisch	mechanisch	sensor
thermisch	optisch	optische thermometer
optisch	thermisch	bolometer
optisch	akoestisch	foto-akoestische detectie
magnetisch	optisch	data-opslag (lezen/schrijven)

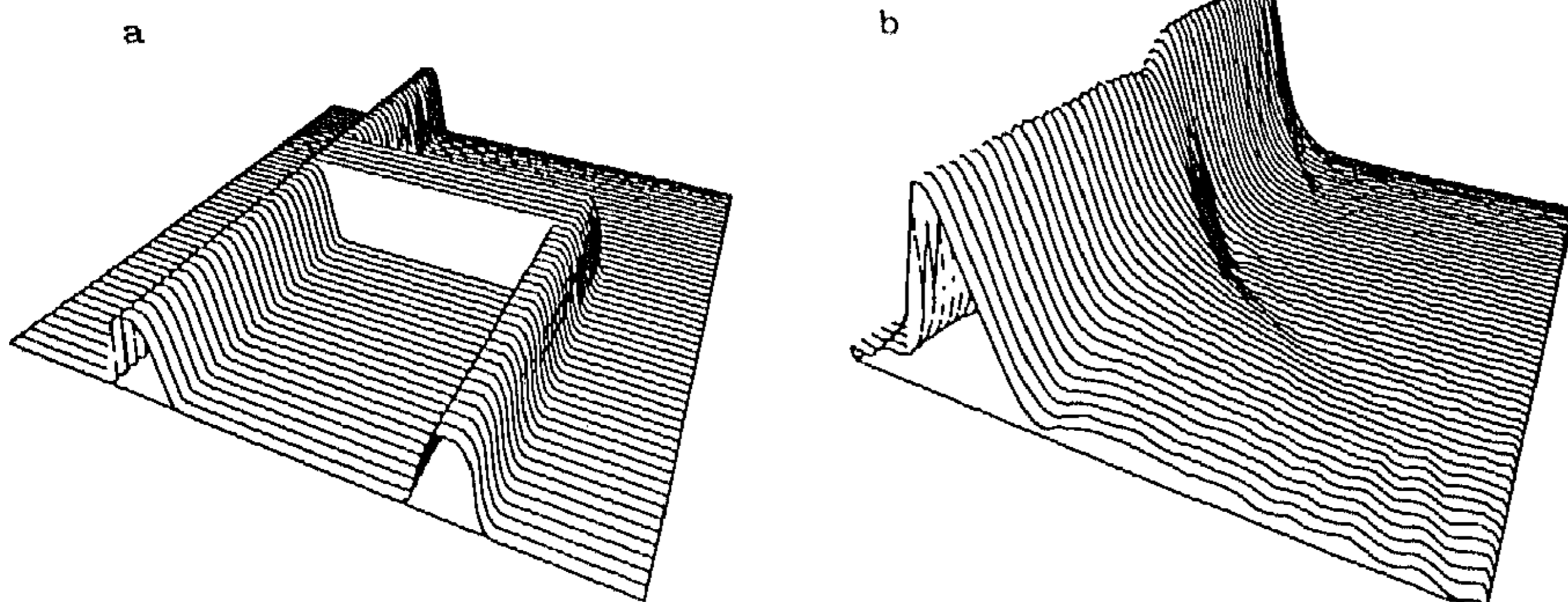
Tabel 1

meerlagen-structuur bevat minstens een zogenaamde kernlaag (dikte 0,5 - 5 fm) die aan boven- en onderzijde omgeven is door een laag met een lagere brekingsindex. Het verschil in brekingsindex zorgt ervoor dat die lichtstralen die onder een voldoende grote hoek vanuit de kernlaag op de grensvlakken invallen volledig worden gereflecteerd. De lichtstralen zijn als het ware opgesloten tussen de lagen met lagere brekingsindex. In Twente wordt veel aandacht besteed



Figuur 2. De verschillende modi in een golfgeleider.

aan het maken van  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ -lagen. Deze lagen bieden de unieke mogelijkheid de brekingsindex in te stellen tussen 1,46 en 2,0, afhankelijk van de waarde van  $x$  en  $y$ . Door ook in laterale richting de (effectieve) brekingsindex te veranderen, door bijvoorbeeld met behulp van etstechnieken een strip te maken, ontstaat er een kanaal waarbinnen de lichtbundel zich voortplant. Een dergelijke strip is te vergelijken met een platgeslagen en op een substraat vastgezette glasvezel. Een lichtstraal zal zich zig-zag door het kanaal in de sandwichstructuur voortplanten waarbij voor sommige invalshoeken constructieve interferentie en daarmee weinig verzwakking plaatsvindt (de zogenaamde modi), zie figuur 2. Iedere mode wordt gekarakteriseerd door een propagatieconstante  $\beta$ . Als de elektrische dan wel magnetische veldvector



Figuur 3. Computersimulatie van een splitsing in een planaire optische golfgeleider: a: geometrie van de golfgeleider b: berekende veldverdeling

van de lichtgolf in het vlak van de lagenstructuur ligt, spreekt men van respectievelijk een TE- en TM-mode. Net als bij de glasvezel volgt het licht het kanaal ook in (niet te scherpe) bochten, kan het gesplitst worden of juist weer bij elkaar gebracht worden. Inmiddels zijn geavanceerde simulatieprogramma's voor componenten en ontwerpsoftware voor het technisch realiseren van eenvoudige structuren ontwikkeld. Als voorbeeld is de simulatie van een splitsing in een optische geleider weergegeven in figuur 3. Deze splitsing is op een naïeve manier analoog aan dat van een elektronische splitsing nagebootst. computersimulatie laat de ontoereikendheid van deze benadering zien. De tweede tak van de planaire structuur wordt gewoonweg geïgnoreerd, het licht gaat grotendeels rechtdoor, de rest verspreidt zich op een ongecontroleerde wijze over de chip. De berekende spreiding van het licht geeft duidelijk het probleem aan waarmee we in het geval van optisch geïntegreerde circuits te maken krijgen.

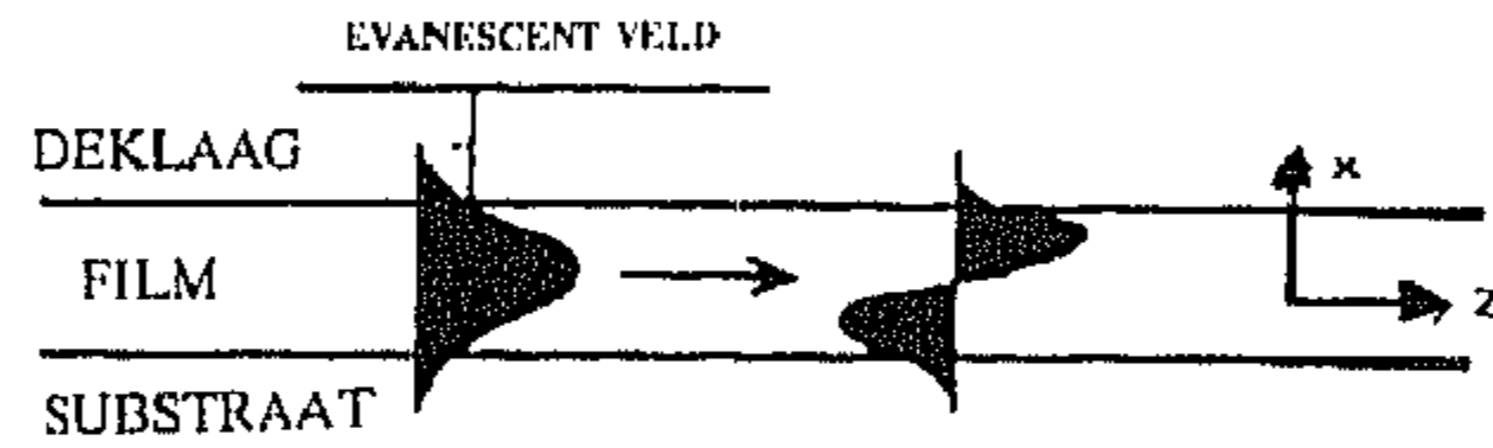
Willen we de mogelijke toepassing van geïntegreerd optische sensoren beter begrijpen dan moeten we de veldverdeling van het elektro-magnetisch veld (E) nader bekijken. Het licht plant zich voor elke golflengte voort in een beperkt aantal patronen: de reeds eerder genoemde geleide modi. Het veldprofiel en de voortplanting van deze modi zijn afhankelijk van de geometrie en de dielektrische constanten van de lagenstructuur. Uit toepassing van de relevante natuurkundige vergelijkingen (de Maxwell-vergelijkingen) volgt dat een klein gedeelte van de lichtenergie zich buiten het gebied met de hoge brekingsindex (de kernlaag of kanaal) voortplant, zie figuur 4. Hoewel de lichtenergie exponentieel met de afstand tot het grensvlak afneemt kan het zich tot enkele fm van dit grensvlak uitspreiden. Men noemt dit het evanescente veld. Het houdt in dat optische eigenschappen in de omgeving van de kernlaag, zoals substraat en toplaag, van invloed kunnen zijn op de modeparameters. Bij het bouwen van optische sensoren dient men daarom met de invloed van substraat en toplaag rekening te houden of, indien mogelijk, juist gebruik ervan te maken door de toplaag bijvoorbeeld zo te kiezen dat zijn optische eigenschappen door de te meten parameter beïnvloed kunnen worden. De mode-parameter wordt met slim ontworpen structuren (CAD) in een intensiteit en daarna in een elektrische spanning omgezet. Vaak vereist het sensor-

Geïntegreerde optica voor sensoren en actuatoren

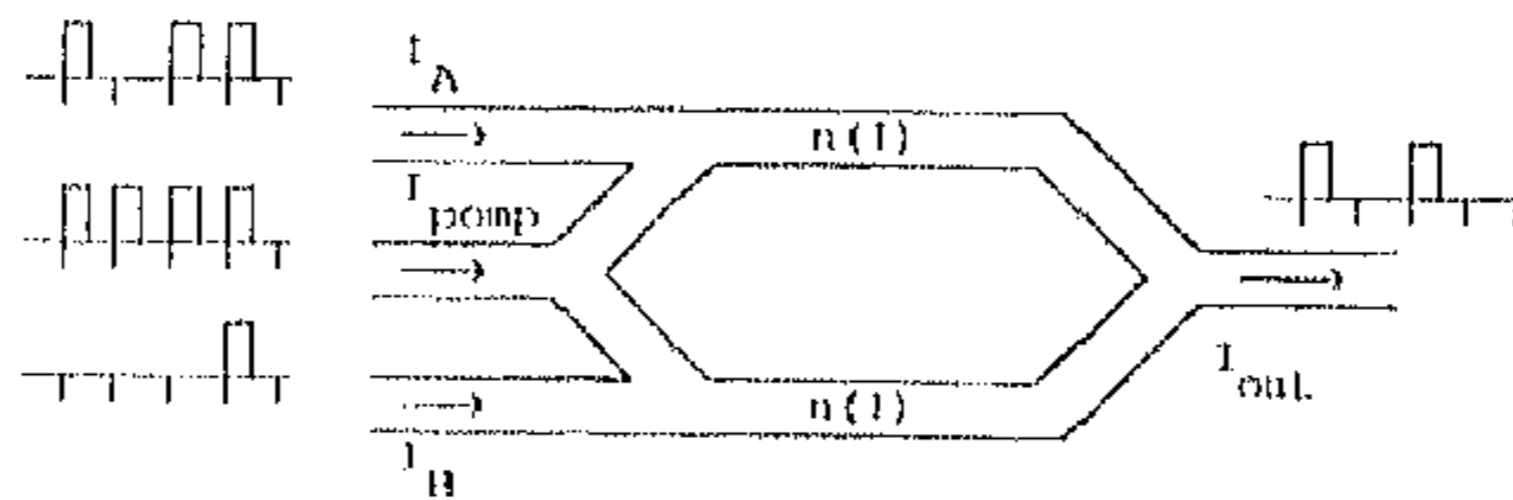
principe licht van een bepaalde frequentie of maar één polarisatie-richting. In de lichtweg kunnen daarom na de lichtbron, vaak een gewone LED, op het IO-circuit de hiervoor nodige (geïntegreerde) optische functies aangebracht worden.

Voorbeelden van geïntegreerde optische sensoren.

Geïntegreerde optische sensoren zijn vaak een geminiaturde versie van reeds bestaande meetsystemen, zoals de Michelson- en de Mach-Zehnder interferometer. De eerst genoemde interferometer is toegepast (in IO-vorm) voor het zeer nauwkeurig meten van verplaatsingen met een bereik van 0-20 cm en een resolutie van 0,1 fm. Ze is een van de weinige geïntegreerde optische sensoren die reeds commercieel verkrijgbaar zijn. Het principe staat aangegeven in figuur 5. Een bundelsplitser stuurt de aangeboden lichtbundel in twee richtingen. Beide bundels worden gereflecteerd en bij hun terugkeer weer door diezelfde splitser samen en tot interferentie gebracht. De intensiteit van de resulterende lichtbundel welke door de fotodetector gemeten wordt hangt af van het verschil in weglengte welke beide lichtbundels doorlo-



Figuur 4. De veldverdeling van geleide modi, respectievelijk 0e en 1e orde mode van een planaire lichtgeleider.



Figuur 6. Niet-lineaire Mach-Zehnder-interferometer als logisch exclusieve-OR-poort.

pen hebben. Stellen we het verschil in optische weglengte gelijk aan  $l$ , dan wordt de resulterende intensiteit  $I_{uit}$  gegeven door:

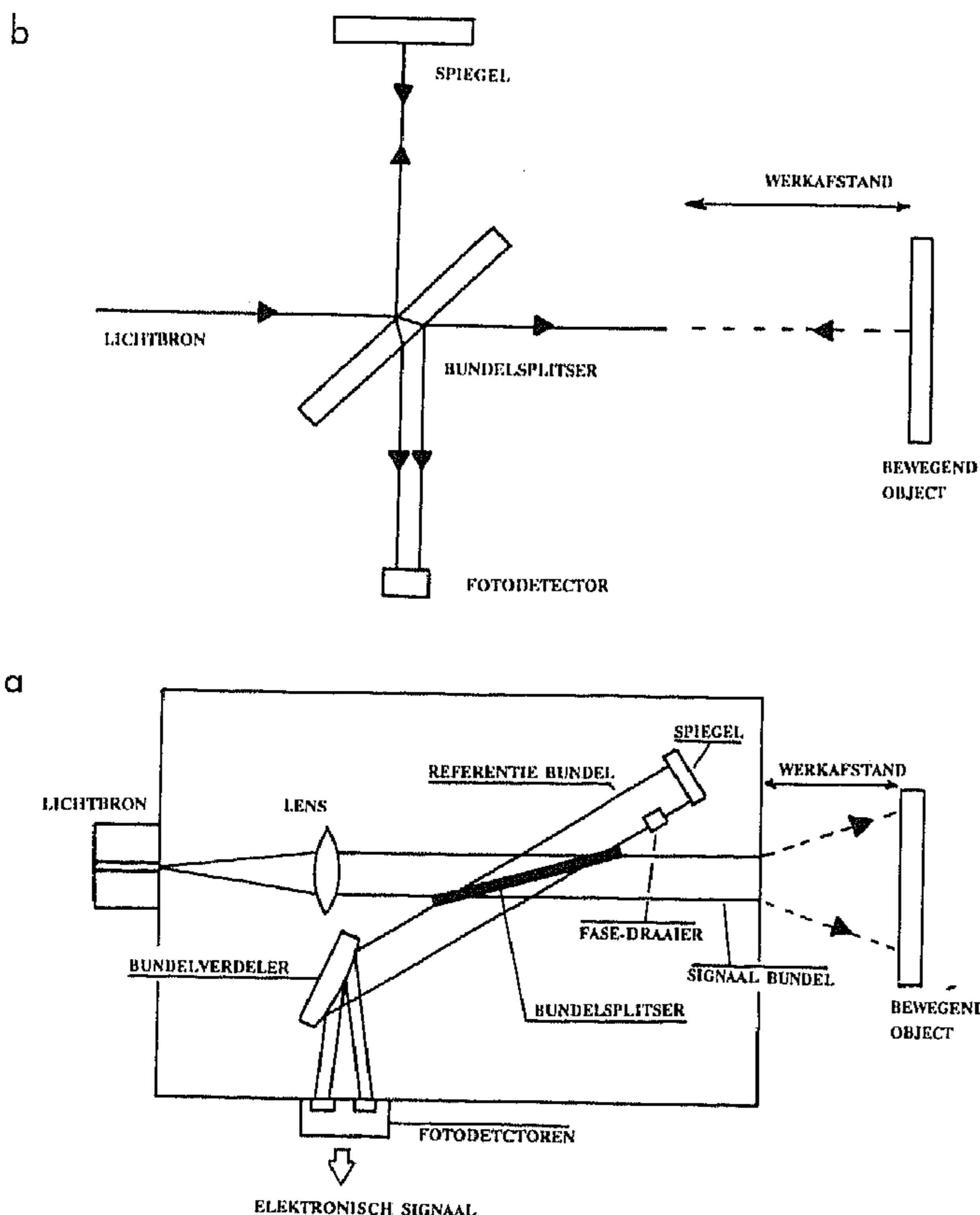
$$I_{uit}/I_{in} = I_2 \cos^2(2\pi \cdot \Delta l / l)$$

waarbij  $l$  de golflengte van het gebruikte licht is. In de uiteindelijke versie worden een faseverschuiver en bundelverdeler aangebracht om zodoende de richting van de verplaatsing te meten. In het geïntegreerde optisch circuit zorgt de lens

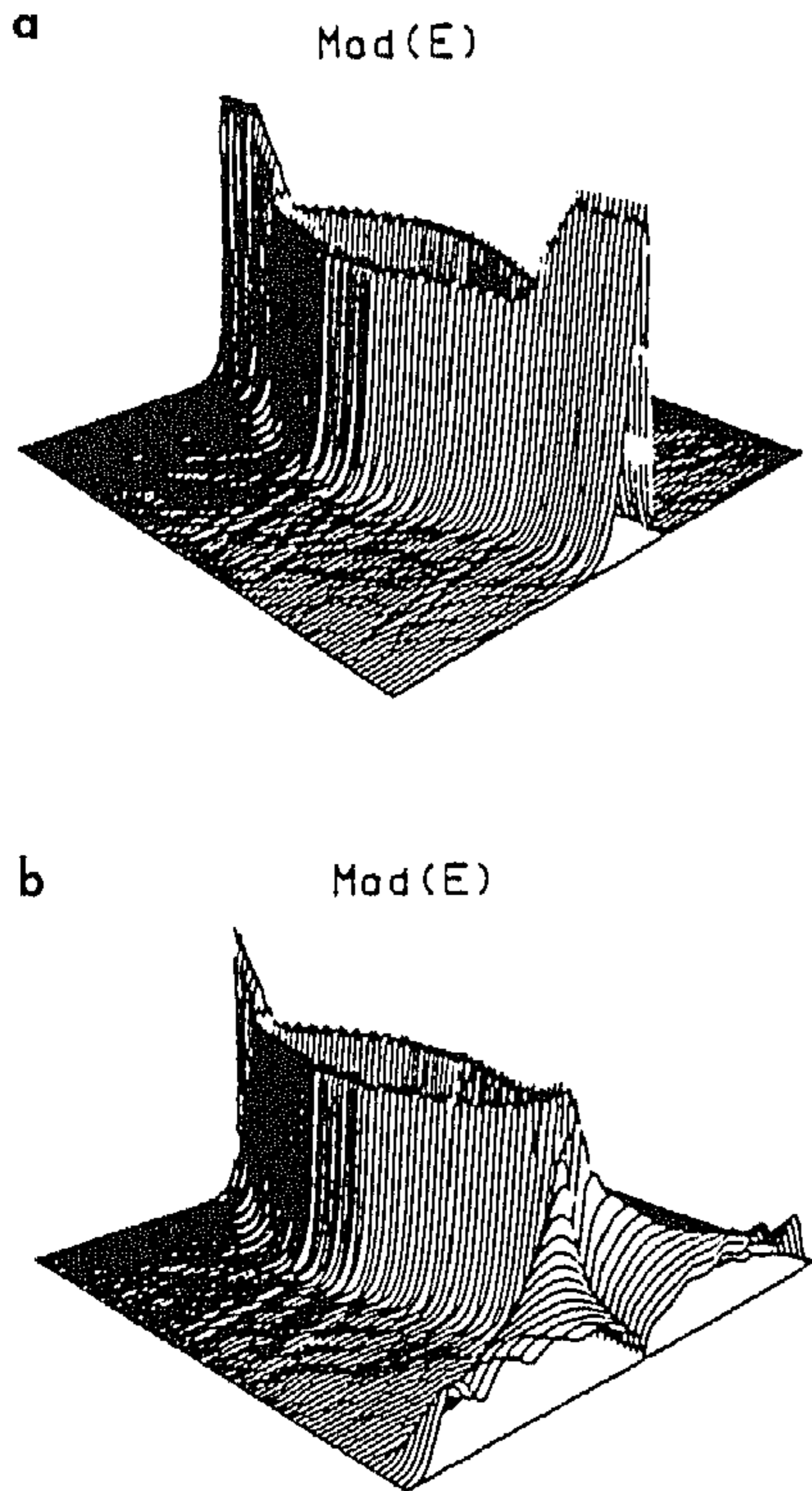
voor de conditioneringsfunctie, de rest zorgt voor de uitlezing. De lens, spiegel, fase-verschuiver en bundelverdeler zijn alle gerealiseerd door lokaal de (effectieve) brekingsindex te verhogen. Deze plaatselijke verhoging van de brekingsindex is in feite niets anders dan het al dan niet weghalen van een toplaag. In dit circuit is het licht alleen in de richting loodrecht op het substraat opgesloten en worden er geen kanaalgeleiders gebruikt. Het te meten object bevindt zich buiten het circuit, evenals de elektronische signaalverwerking.

De Mach-Zehnder interferometer kan wegens zijn gevoeligheid in het detecteren van kleine brekingsindexverschillen uitstekend dienst doen als optische sensor. Hiervoor wordt op een van de takken een laag aangebracht die voor een bepaalde grootte gevoelig is en waarvan hierdoor de brekingsindex verandert. De sensor maakt gebruik van het feit dat er een evanescent veld aanwezig is. In dit type sensoren vindt de modulatie plaats in de lichtgeleider en wordt daarom ook een intrinsieke sensor genoemd. Met deze sensor is het ook mogelijk om zeer kleine verplaatsingen van een lichaam in het evanescente veldgebied te meten. Zo'n verplaatsing is immers equivalent met een lokale verandering van de diëlektrische constante.

De M-Z- interferometer is een voorbeeld van een device, dat met geschikte niet-lineaire materialen niet alleen als sensor maar ook als versterker en logische poort kan worden gebruikt. In figuur 6 staat een schematische weergave van de interferometer als logische poort. Het "pomp"-lichtsignaal met willekeurige intensiteit en golflengte wordt gesplitst en weer samengebracht. De beide takken zijn zo ontworpen dat bij samenkomst beide bundels een faseverschil van precies  $\pi$  hebben. Het resultaat is volledige uitdoving: de intensiteit aan de uitgangspoort is gelijk nul. Wordt er echter een signaal bij A of B aangeboden, dan wordt de intensiteit in de betreffende tak hoger, waardoor ter plaatse ten gevolge van het niet-lineaire karakter van het materiaal de brekingsindex verandert. Hierdoor is het faseverschil tussen de twee takken aan de uitgangspoort niet meer gelijk  $\pi$ , waardoor er een uitgangssignaal ontstaat. Wordt aan beide ingangspoorten A en B hetzelfde lichtvermogen aangeboden, dan is het faseverschil weer gelijk  $\pi$ . Brekingsindexverschillen kleiner dan  $10^{-4}$  tussen de takken kunnen al leiden tot het faseverschil  $\pi$ . De interferometer in deze vorm werkt



Figuur 5. Michelson-interferometer; geïntegreerde optische versie (a) en basisprincipe (b).



Figuur 7. Computerberekeningen van de lichtintensiteit in een Mach-Zehnder-interferometer; a: AAN-toestand, faseverschil 0°; b: UIT-toestand, faseverschil 180°.

dus als een exclusieve-OR-poort. Figuur 7 geeft als voorbeeld de met de bundel-propagatie-methode berekende lichtintensiteit in een uit twee tegenovergestelde Y-juncties samengestelde Mach-Zehnder-interferometer, met een faseverschil van 0 (AAN) en een faseverschil van 180 (uitdoving of UIT).

Naast deze twee voorbeelden van geminiaturiseerde uitgaven van bestaande meetprincipes zijn er ook in de geïntegreerde optica meetprincipes mogelijk die geen (volledig) macro-optisch equi-

valent kennen. Zoals we gezien hebben loopt van een gewone lichtgeleider-mode slechts een paar procent van de licht-energie buiten de kernlaag. Voor sommige toepassingen, zoals het aftasten van een gevoelige laag, wil men dat percentage vergroten. Dit is mogelijk door gebruik te maken van oppervlakteplasmonen. Zo'n oppervlakteplasmon is een geleide mode, die langs het grensvlak van een metaal (bijvoorbeeld zilver) en een diëlektricum kan propageren. Het blijkt dan dat vrijwel de helft van de licht-energie in het diëlektricum kan lopen, resulterend in een sterk vergrootte gevoeligheid voor veranderingen van de optische eigenschappen van dit materiaal. Het nadeel is dat het gebruik van de oppervlakteplasmonen in combinatie met de Mach-Zehnder interferometer niet mogelijk is, daar binnen enkele tientallen micrometers alle energie door de metaallaag wordt geabsorbeerd.

Voor de uitlezing echter kan worden gebruik gemaakt van het zogenaamde mode-koppeling principe. Op een monomode lichtgeleider wordt een meerlagenstructuur aangebracht, zie figuur 8. In deze structuur plant het plasmon zich voort langs het grensvlak van de zilveren de sensorlaag. Een bron genereert een band van verschillende golflengtes in de onderliggende lichtgeleider. Voor elke golflengte kan er een mode door het kanaal lopen, waarvan de propagatieconstante met de golflengte verloopt. Door mode-koppeling gaat alleen de energie van de kanaal-mode met dezelfde propagatieconstante als het bij de uitgang "ontbrekende" plasmon over naar het oppervlakteplasmon en wordt daarin gedissipeerd. De golflengte van het licht (de dip in de golflengteband) is een maat voor de te meten parameter.

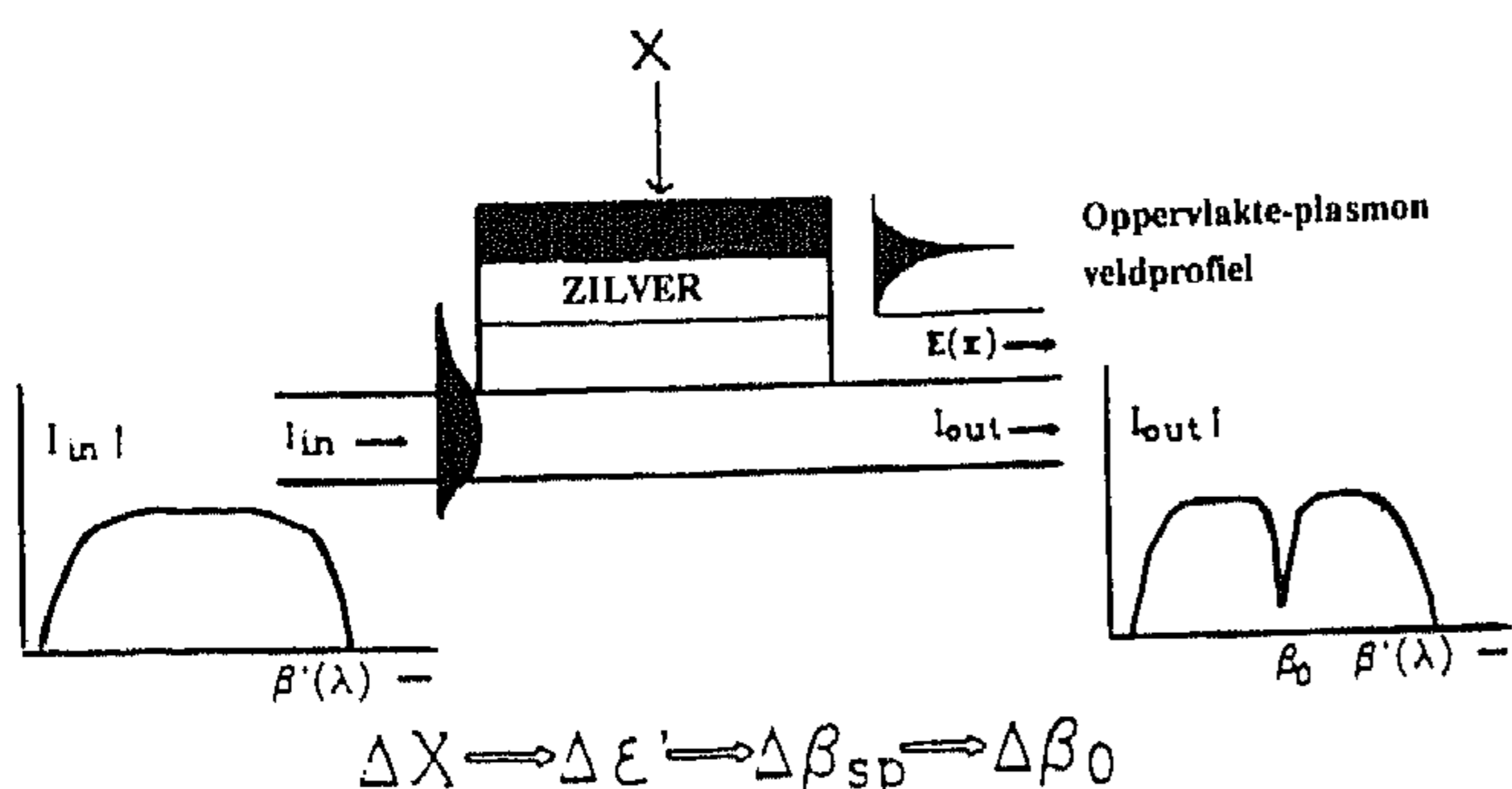
In figuur 9 is een andere uitvoeringsvorm van het bovengenoemde principe weergegeven. In elk van de mono-mode-kanaalen wordt vanuit een monochromati-

sche lichtbron een mode gelanceerd. Door onderlinge geometrieverschillen van de kanalen in deze array heeft elke kanaal een verschillende propagatieconstante. Het nummer van het kanaal waarin de uitdoving van de lichtintensiteit optreedt is bepalend voor de waarde van de te meten parameter. Op basis van dit oppervlakteplasmon-principe is een (prototype) chemo-optische vochtsensor gemaakt. De sensorlaag bestaat uit gelatine, die met vocht opzwellt en daarmee verandering van de brekingsindex veroorzaakt.

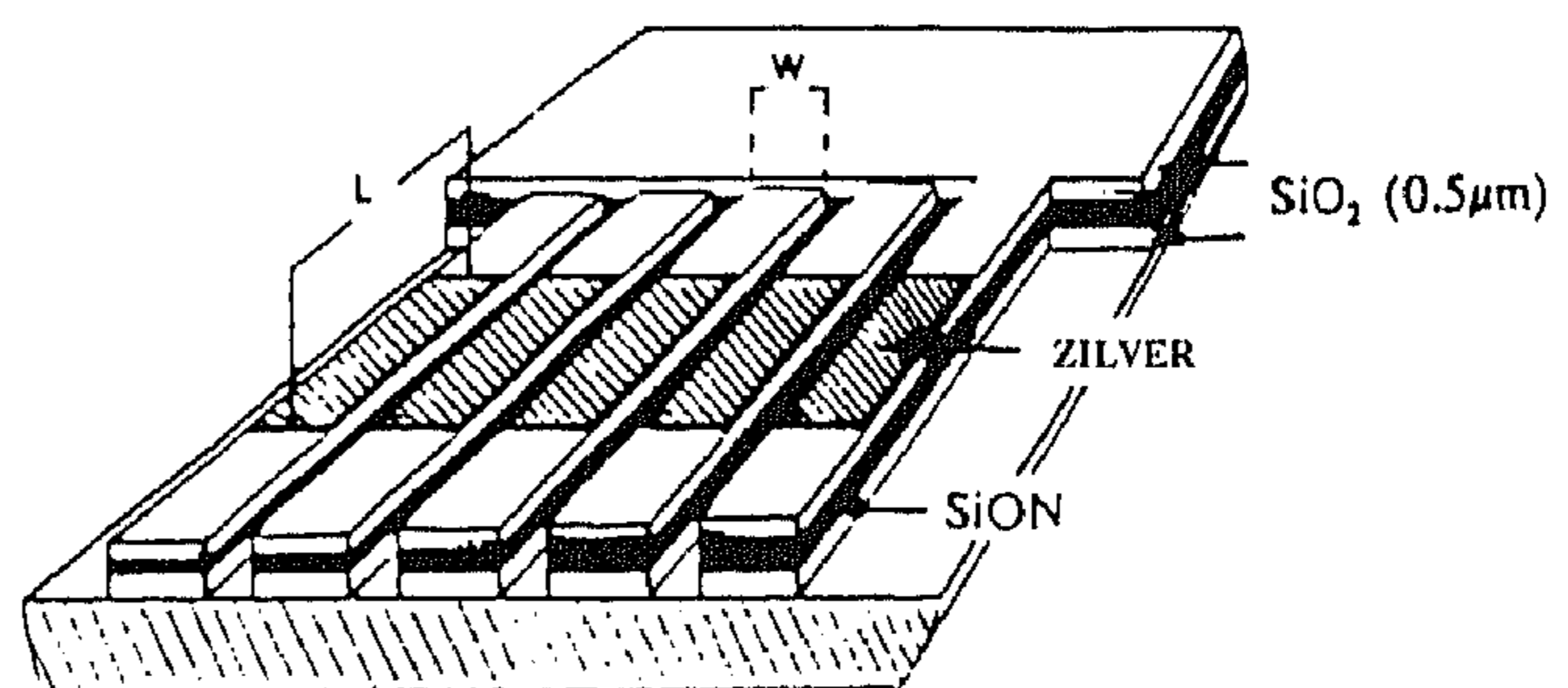
### Toekomstperspectief

Algemeen wordt aangenomen dat de ontwikkeling van geïntegreerd optische componenten aan het begin van een explosieve groei staat. Voor zo een succesvolle ontwikkeling van geïntegreerde optica is een samenwerking uit diverse disciplines noodzakelijk. De chemie speelt in deze een belangrijke rol. Met name de Molecular Engineering, het manipuleren van de eigenschappen van materialen op atomair niveau, is van essentieel belang. Hierbij kan men denken aan niet-lineaire organische materialen of aan zogenaamde fotochemische moleculaire componenten waarin op moleculair niveau veranderingen door licht kunnen plaatsvinden.

De natuurkunde zorgt voor het begrijpen en berekenen van de lineaire en niet-lineaire wisselwerking tussen het licht en de materie, maar ook voor de optische principes waarin deze toegepast wordt. Daarnaast is materiaalkunde nodig om materialen te ontwikkelen, waarin de fysische effecten optimaal zijn. De elektrotechniek draagt zorg voor technologie en ontwerp-gereedschappen voor vervaardigen van een concreet device of systeem. Onderlinge samenwerking moet uiteindelijk leiden tot innovatieve componenten gebaseerd op nieuwe op-



Figuur 8. Oppervlakteplasmon-resonantiesensor. De positie van de "dip" in de uitgaande band is een maat voor de te meten grootheid.



Figuur 9. Schets van een geïntegreerd optische oppervlakteplasmon sensor in array-uitvoering. Op elk kanaal ligt over een afstand L de "gevoelige" laag.

Geïntegreerde optica voor sensoren en actuatoren

tisch (niet-lineaire) materialen, nieuwe technologieën of nieuwe principes. In toenemende mate zullen optische transducenten worden toegepast in gebieden, waarin tot nu toe alleen elektronische componenten beschikbaar waren. Een schematisch overzicht is gegeven in figuur 10. Het belangrijkste toepassingsgebied is de optische telecommunicatie. Naar schatting zullen in het jaar 2000 meer dan een miljoen bedrijven binnen Europa toegankelijk zijn via de glasvezel. Daarnaast worden de Compact Discs en magneto-optische diskettes, in feite ook optische transducenten, al veelvuldig gebruikt als data-opslagmedium met hoge informatiedichtheid. Het illustreert de grote opkomst van de optische technologie.

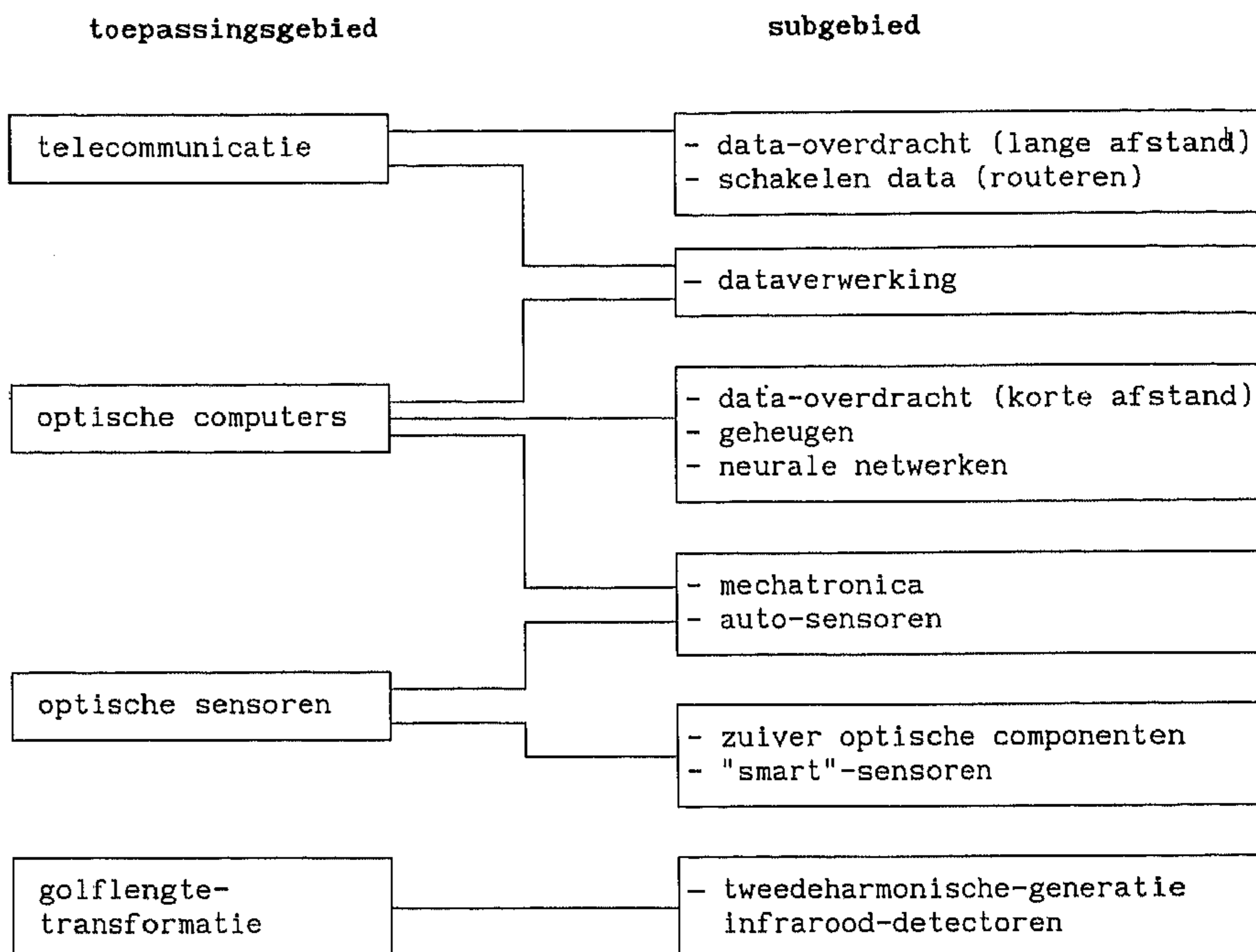
Literatuur

[1] P.V. Lambeck, Chemo-optical micro-sensing systems, SPIE Vol. 1511, Fiber Optic Sensors: Engineering and Applications (1991) 100-113.  
 [2] A. Driessen en P.V. Lambeck, Optical Transducers, Sensors & Actuators: edited by A. Driessen, Kluwer Techn. Books, Deventer (1990).  
 [3] H.J.M. Kreuwel, Planar waveguide sensors for the chemical domain, Proefschrift, Universiteit Twente (1988).

Dr. D. Blank is werkzaam bij de vakgroep Technische Natuurkunde van de Technische Universiteit Twente.

Dr. A. Driessen is werkzaam bij de vakgroep Transductie Techniek en Materiaalkunde van de Technische Universiteit Twente.

Het artikel is hoofdzakelijk gebaseerd op gepubliceerd werk van dr. A. Driessen en dr. P.V. Lambeck van de vakgroep Transductie Techniek en Materiaalkunde van de Universiteit Twente en is in samenwerking met hen tot stand gekomen.



Figuur 10. Toepassingsgebieden van optische transducenten.

Her en Der

H. Heubers

Kogel als afstandhouder

Wat doe je als een bus op 5 mm afstand van de wand van een buitenbus moet worden geplaatst en zowel thermisch als elektrisch geïsoleerd moet zijn? Instrumentmaker T. Vos van de Werkplaats Fysica, RUU bedacht daar het volgende op. Hij nam kwartskogels van 5 mm en een stukje plaat van 0,1 mm dikte. In de plaat ponste hij gaatjes van 4,5 mm en knipte ruitvormige stukjes af. Met deze plaatjes, die op de bodem en de wand van de bus zijn gepuntlast, worden de kogels geklemd, zie de figuur. De kogels isoleren de bus thermisch en elektrisch en verzorgen een goede positionering.

