

## Glasfibers voor optische communicatie\*

R. G. Gossink  
N.V. Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven

In dit artikel worden twee methoden besproken die voor de vervaardiging van glasfibers voor optische communicatie, met laag optisch verlies en nauwkeurig beheerst brekingsindexprofiel, in aanmerking komen. De eerste methode maakt gebruik van het dubbele-kroes proces, de tweede van chemische opdamptechnieken.

### Inleiding

De toepassing van dunne glasfibers in kabels voor communicatie-doeleinden is voor het eerst voorgesteld in 1966 (1). In een stormachtige ontwikkeling, die slechts circa tien jaar heeft geduurd, is dit idee dicht bij praktische realisering gekomen. Hoofddoelcomponenten van een glasfibercommunicatiesysteem zijn:

- aan de zenderkant een halfgeleider lichtbron (GaAs-laser of lichtemitterende diode, golflengte 800-900 nm, d.w.z. in het nabije infrarood);
- als transmissiemedium een glasfiber met een ononderbroken lengte van tientallen meters tot meer dan tien kilometer;
- aan de ontvangerkant een Si lawinefotodiode.

Voordelen van dit systeem boven systemen die bij lagere frequenties werken en koper als transmissiemedium gebruiken, kunnen o.a. zijn:

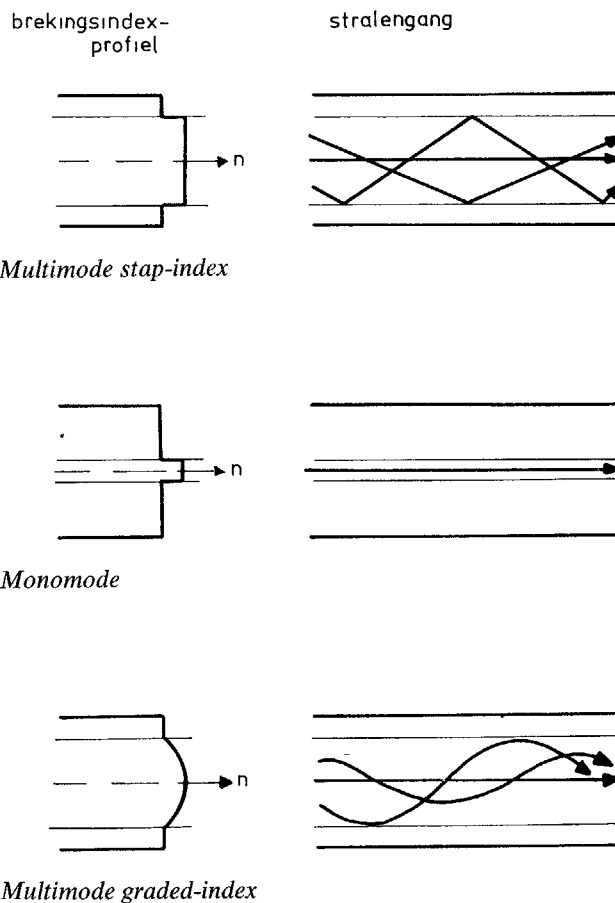
- grotere bandbreedte (transmissiecapaciteit);
- grotere afstanden tussen de versterkerstations;
- ongevoeligheid voor elektrische stoorvelden.

Dit artikel zal voornamelijk de toepassing in breedbandige telefonesystemen in gedachte houden, omdat de eisen die aan de glasfiber worden gesteld, daarbij het strengste zijn. Ook zal slechts aandacht worden geschonken aan één van de hoofddoelcomponenten van het systeem: de glasfiber. Andere aspecten vindt men o.a. behandeld in een aflevering van Philips Technisch Tijdschrift (2).

Er bestaat een groot aantal typen glasfiber, die echter enkele gemeenschappelijke kenmerken hebben:

- de diameter bedraagt gewoonlijk ca. 100  $\mu\text{m}$ ;
- de brekingsindex is in het centrale gedeelte gewoonlijk ca. 1% hoger dan daarbuiten. Op deze manier wordt het licht in het midden van de fiber geconcentreerd en wordt voorkomen dat het aan het oppervlak door verstrooiing aan stofdeeltjes, krasjes, e.d. verloren gaat.

De meest voorkomende brekingsindexprofielen zijn weergegeven in figuur 1. In de multimode fiber met een stapsgewijze verloopend brekingsindexprofiel ('stap-index'), kan het licht zich onder vele hoeken voortplanten, waardoor pulsen afkomstig van de GaAs-lichtbron al snel uitgesmeerd raken en onherkenbaar worden. Dit type fiber is daarom slechts bruikbaar over korte afstanden.



Figuur 1. Brekingsindexprofiel en stralengang in drie typen glasfiber.

In de monomode fiber heeft de kern een diameter van slechts enkele  $\mu\text{m}$  en treedt in het geheel geen uitsmering (pulsdispersie) op, anders dan door materiaaleigenschappen. Door de geringe afmeting van de kern is echter het koppelen van fibers met elkaar en met de lichtbron uiterst lastig.

\* Dit artikel is eerder gepubliceerd in *Klei en Keramiek* 26 (1976) 230-238

Om deze reden lijkt de multimode fiber met gegradeerde brekingsindex ('graded-index') een meer aantrekkelijke mogelijkheid. In het kerngebied heeft de brekingsindex bij deze fiber een nagenoeg parabolisch verloop. De lichtstralen planten zich hierdoor golvend voort; stralen met een grotere amplitude leggen weliswaar een langere weg af, maar hebben ook een hogere gemiddelde snelheid, omdat ze langer verblijven in een gebied met lagere brekingsindex. Hierdoor treedt een egaliserend effect op dat de pulsdispersie verregaand vermindert. In het vervolg van dit artikel zal worden besproken hoe deze graded-index fibers succesvol kunnen worden vervaardigd.

Daarbij moeten de fibers – behalve een nagenoeg parabolisch indexprofiel – nog een aantal andere eigenschappen bezitten:

- brekingsindexprofiel en geometrie mogen slechts weinig fluctueren over de lengte. Bij 'geometrie' denke men aan diameter van kern en mantel, centriciteit en rondheid. In het algemeen geldt als eis dat de fluctuaties binnen  $\pm 1\%$  moeten blijven om te grote koppelverliezen te voorkomen;
- de fiber moet mechanisch voldoende sterk zijn. Een pasgetrokken fiber met een diameter van  $100 \mu\text{m}$  en een onbeschadigd oppervlak kan een trekkracht van enkele kilogrammen verdragen zonder te breken. Om deze conditie zoveel mogelijk te bewaren wordt de fiber onmiddellijk bij het trekken van een kunststoflaagje voorzien;
- de fiber moet een gering optisch verlies vertonen, d.w.z. het licht dat zich door de fiber voortplant mag slechts weinig verstrooid en geabsorbeerd worden.

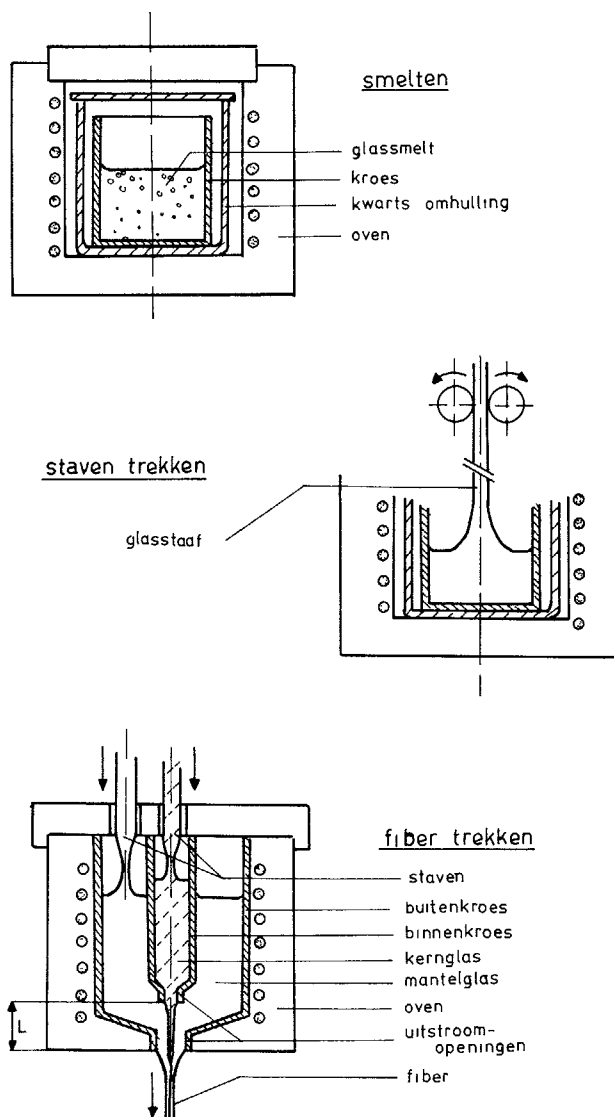
Het optisch verlies wordt gewoonlijk uitgedrukt in  $\text{dB/km}^*$ . Voor breedbandige transmissie over langere afstanden stelt men als eis een verlies van  $5 \text{ dB/km}$  of minder. Dit betekent dat er na  $2 \text{ km}$  nog minstens  $10\%$  van de oorspronkelijke intensiteit over moet zijn.

De glassoorten die voor communicatiefibers gebruikt worden hebben in het nabije infrarood een intrinsiek optisch verlies, d.w.z. een verlies samenhangend met de glasstructuur, van minder dan  $2 \text{ dB/km}$ . Hogere verliezen kunnen het gevolg zijn van extrinsieke oorzaken, en met name van:

- geringe hoeveelheden hydroxylgroepen of overgangsmetalen als Fe en Cu, die altijd in kleinere of grotere concentratie in glas aanwezig zijn. Deze zorgen in vensterglas bijvoorbeeld voor een optisch verlies van de orde van  $10^4 \text{ dB/km}$ . Om minder dan  $5 \text{ dB/km}$  te bereiken moet de hydroxylconcentratie tot minder dan  $10 \text{ ppm}$  ( $1 \text{ ppm} = 10^{-4} \text{ gew. \%}$ ) en de concentratie van ieder overgangsmetaal zelfs tot minder dan  $0,05 \text{ ppm}$  beperkt worden;
- insluitels als kristalletjes en belletjes.

De bereidingsmethoden voor optische glasfibers dienen derhalve extreem zuiver te zijn en een extreem goede beheersing van de geometrie en het brekingsindexprofiel mogelijk te maken.

In de afgelopen tien jaar zijn twee afzonderlijke bereidingswijzen in de belangstelling gekomen. De eerste is afgeleid van klassieke glassmelttechnieken en probeert deze op zeer zuivere wijze uit te voeren. De tweede is ontleend aan opdampproceduren die gebruikelijk zijn in de halfgeleidertechnologie. Fibers geproduceerd volgens de eerste methode zullen hier zachtglasfibers worden genoemd, die volgens de tweede methode kwartsglasfibers.



Figuur 2. stappen bij de bereiding van zachtglasfibers.

#### Zachtglasfibers; de dubbele-kroes methode

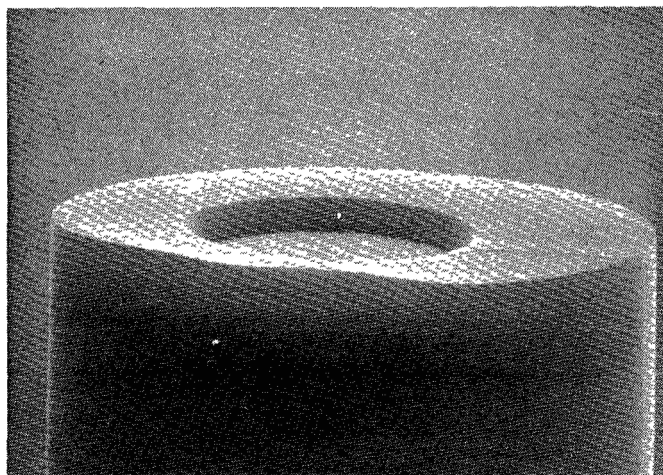
Bij zachtglasfibers is de eerste bereidingsstap het smelten van homogene en bellenvrije glazen uit poedervormige grondstoffen. De smelttemperaturen liggen gewoonlijk bij  $1100\text{--}1400^\circ \text{C}$ . Een groot voordeel is dat men met kleine hoeveelheden kan volstaan, immers  $1 \text{ km}$  glasfiber met een dikte van  $100 \mu\text{m}$  heeft slechts een volume van  $7 \text{ cm}^3$ .

Grondstoffen als  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ , enz. met een zuiverheid voldoende voor optische fibbers, zijn in de afgelopen jaren commercieel verkrijgbaar geworden. Verdere verbeteringen zijn nog te verwachten.

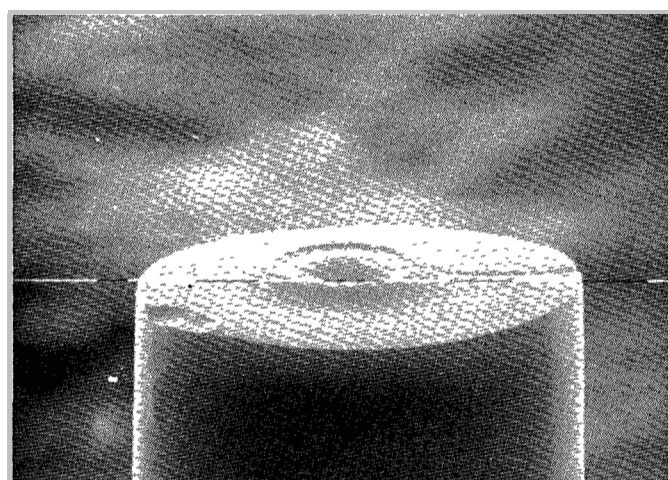
\* gedefinieerd als  $10 \log_{10} \left( \frac{\text{oorspronkelijke intensiteit}}{\text{intensiteit na } 1 \text{ km}} \right)$

Geschikte kroesmaterialen voor de bereiding van kleine hoeveelheden zuiver glas zijn platina en kwartsglas. Bij platina gebruikt men gewoonlijk een normale elektrische weerstandsoven voor de verhitting. De smelt wordt van de betrekkelijk onzuivere ovenmaterialen afgeschermd door een kwartsglazen omhulling (figuur 2).

Bij een kroes van kwartsglas kan ook met succes gebruik worden gemaakt van een bereidingswijze, waarbij men het glasgemeng tot een zodanige temperatuur voorverhit dat het voldoende elektrisch geleidend wordt om inductieve verhitting mogelijk te maken (3). De (niet-geleidende) kwartskroes blijft relatief koud en kan zelfs door waterkoeling op kamertemperatuur worden gehouden. Dit voorkomt aantasting van de kroes door de smelt.



A: stap-index;



B: graded-index.

Figuur 3. Geëtste uiteinden van twee alkaligermanosilikaatfibers.

Het glas moet nu uit de kroes verwijderd worden zonder dat verontreiniging optreedt. Een geschikte methode is het glas in aansluiting op het smelten uit te trekken tot staven met een dikte van 5-10 mm (zie figuur 2). Deze staven zijn geschikt voor opslag en kunnen tevens gebruikt worden om de kwaliteit van het geproduceerde glas (optisch, chemisch) te controleren.

De glasfiber wordt tenslotte vervaardigd door middel van de dubbele kroesmethode, die in figuur 2 schematisch is weergegeven. De glasstaven van kern- en mantelsamenstelling worden in een systeem van twee concentrische platinakroesen gevoerd, dat op een temperatuur van 800-1000° C is gebracht. De kroezen zijn voorzien van uitstroomopeningen, waardoor het glas kan wegvloeien om uitgetrokken te worden tot een fiber.

In het gebied aangegeven met L zijn kern- en mantelglas op hoge temperatuur met elkaar in contact. Zorgt men ervoor dat het glas componenten bevat die een snelle diffusie vertonen en die bovendien in sterke mate de brekingsindex beïnvloeden, dan wordt in het gebied L het stap-index profiel omgezet in een graded-index profiel.

Het blijkt dat alleen eenwaardige ionen een dergelijke snelle diffusie kunnen opleveren. Tot nu toe zijn twee geschikte glascombinaties gevonden. Bij de eerste gebruikt men een  $Tl^+$  bevattend borosilikaatglas voor de kern en een  $Na^+$  bevattend borosilikaatglas voor de mantel. Het  $Tl^+$  zorgt voor een hogere brekingsindex dan  $Na^+$ . Deze mogelijkheid wordt toegepast door Japanse onderzoekers (4). Een andere geschikte glassamenstelling is alkaligermanosilikaatglas. Voor de kern gebruikt men  $Na_2O - GeO_2 - SiO_2$  glas en voor de mantel  $K_2O - GeO_2 - SiO_2$  glas (5). Het is een bijzonderheid van  $GeO_2$ -bevattend glas, dat  $Na^+$ - en  $K^+$ -ionen aanleiding geven tot aanzienlijke brekingsindexverschillen.

De voornaamste moeilijkheid bij het bereiden van zachtglasfibers is het handhaven van een grote zuiverheid. Dit is toe te schrijven aan de 'openheid' van de methode, waardoor verontreinigingen uit de omgeving gemakkelijk in het produkt terecht kunnen komen. Gebruik van stofarme voorzieningen is dan ook noodzakelijk.

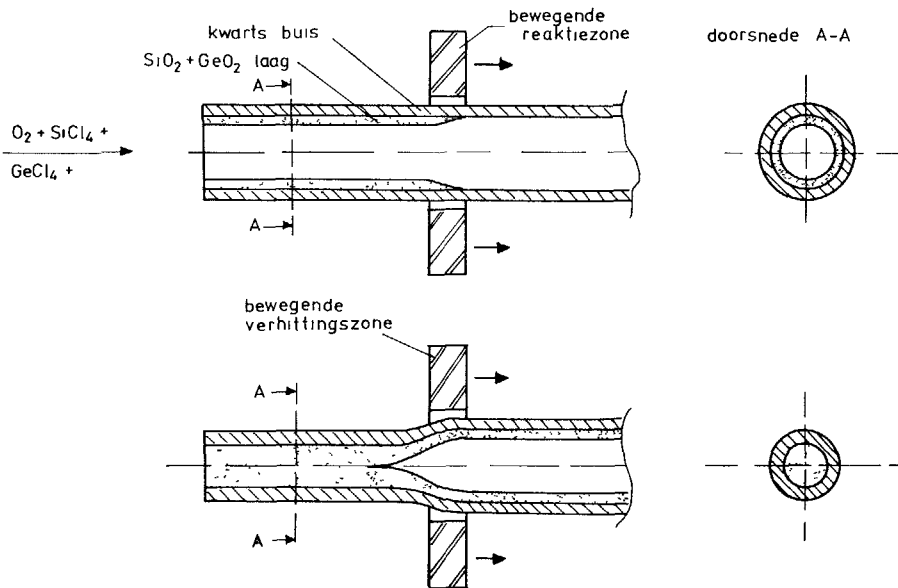
Ondanks deze moeilijkheid is men er in geslaagd zachtglasfibers te bereiden met een optisch verlies van minder dan 10 dB/km en zelfs van 5 dB/km (4) in het golflengtegebied van de GaAs-diode.

Figuur 3 laat opnamen van het uiteinde van twee alkaligermanosilikaatfibers zien, die aangeëtst zijn met een HF-oplossing; de opnamen zijn gemaakt met een rasterelektronenmikroskoop. Figuur 3A toont een stap-index fiber en figuur 3B een graded-index fiber (de richel in het profiel wordt veroorzaakt door een abnormaal etsgedrag, niet door afwijkingen in het diffusieprofiel).

#### Kwartsglasfibers; de opdampmethode

Bij kwartsglasfibers wordt het materiaal waardoor het licht zich voortplant bereid via gasfasereacties. In de meeste gevallen (6) gaat men uit van een kwartsglasbuis, die tegelijk als reaktiekamer, als substraat en als mantelmateriaal voor de uiteindelijke glasfiber dienst doet (figuur 4).

In de buis voert men zuurstof, siliciumchloride en één of meer andere chloriden, zoals  $GeCl_4$ . In een korte reactiezone, die men kan verkrijgen door de buis plaatselijk tot 1400-1700 °C te verhitten, reageren de chloriden met zuurstof onder de vorming van oxiden:  $SiCl_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 + 2Cl_2$ . Het  $GeCl_4$  reageert tot  $GeO_2$ , dat in het  $SiO_2$  wordt opgenomen en de brekingsindex verhoogt.



Figuur 4. Schematische weergave van de bereiding van een voorvorm voor een kwartsglasfiber met het opdampproces.

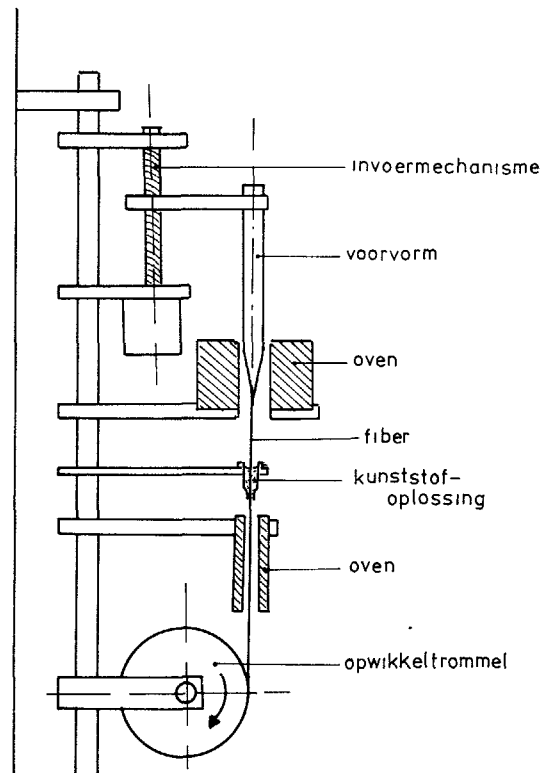
Dit alles speelt zich voornamelijk in de gasfase af, onder vorming van een 'glasroet', dat zich op de binnenkant van de buis afzet en door de hoge temperatuur onmiddellijk tot een glasachtig laagje insmelt. Door de reactiezone over de buis heen en weer te bewegen kan men vele lagen over elkaar deponeren. Indien men elke laag een ander GeO<sub>2</sub>-gehalte en dus een andere brekingsindex geeft, kan men op eenvoudige wijze een brekingsindexprofiel creëren.

In een bijzonder elegante variant van dit proces (7) is de verhittingszone vervangen door een microgolftrilholte, die een plasma in de buis onderhoudt. In dit plasma geschiedt de oxidatie van de chloriden snel en volledig, en speelt de reactie zich geheel aan de wand van de buis af. Men kan de reactiezone daarom snel heen en weer bewegen en zeer dunne glaslaagjes afzetten, waardoor men het brekingsindexprofiel zeer goed in de hand heeft.

In plaats van of samen met GeO<sub>2</sub> kan men het SiO<sub>2</sub> ook o.a. doteren met B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

In de volgende processtap (zie figuur 4) voert men de temperatuur zodanig op (tot ca. 1800 °C) dat de kwartsglazen buis gaat verweken en onder het passeren van de verhittingszone ineenvloeit tot een massieve staaf. Deze staaf – waarin de structuur van de uiteindelijke glasfiber al vergroot aanwezig is – wordt de 'voorvorm' genoemd. De voorvorm, die bijvoorbeeld een diameter van ca. 5 mm en een lengte van 1 m heeft, kan tenslotte uitgetrokken worden tot een glasfiber van 100 µm dikte met een trekapparaat zoals schematisch in figuur 5 is afgebeeld.

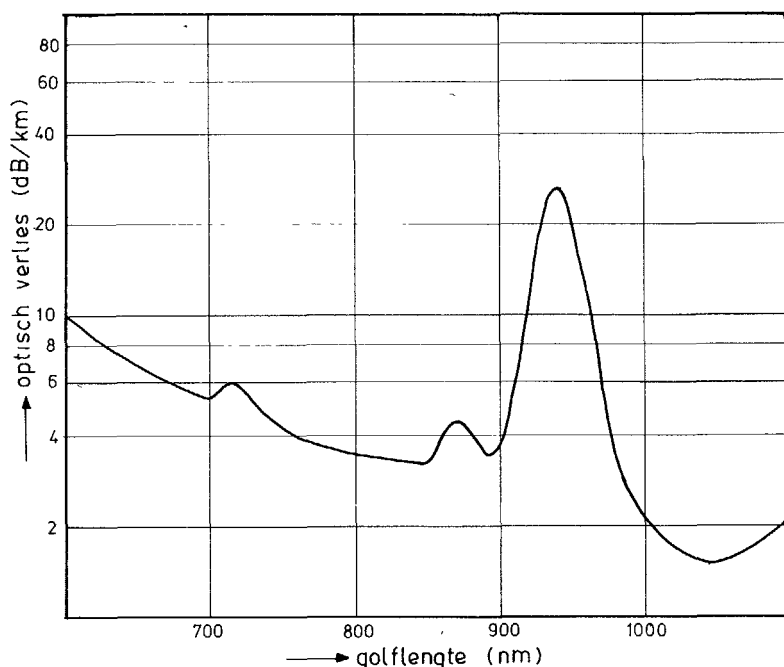
Dit apparaat is verregaand gelijk aan het trekapparaat voor zachtglasfibers, met het verschil dat zich op de plaats van de dubbele-kroesoven nu een oven bevindt die de voorvorm tot ca. 2000 °C verhit. Dit kan bijvoorbeeld geschieden met een waterstof-zuurstofbrander of met een grafiet-weerstandsoven. Zoals reeds eerder opgemerkt worden glasfibers, zowel die van zachtglas als die van kwartsglas, onmiddellijk bij het trekken voorzien van een kunststoflaagje. Dit kan bijvoorbeeld door de fiber tussen oven en opwikkeltrommel door een vaatje te leiden, dat een oplossing van de betreffende kunststof bevat (figuur 5).



Figuur 5. Schematische weergave van een apparaat voor het trekken van glasfibers.

Het bereidingsproces voor kwartsglasfibers biedt twee voordelen boven dat voor zachtglasfibers:

- met het opdampproces is een zeer nauwkeurige beheersing van het brekingsindexprofiel mogelijk;
- het opdampproces is een gesloten proces en daardoor weinig gevoelig voor verontreiniging.



Figuur 6. Optisch verliespectrum van een kwartsglasfiber gedoteerd met  $\text{GeO}_2$  en  $\text{B}_2\text{O}_3$  (7).

Vele laboratoria hebben dan ook kwartsglasfibers vervaardigd met een verlies van minder dan 5 dB/km in het golflengtegebied van de GaAs-diode. Een voorbeeld van een verliespectrum van een met  $\text{GeO}_2$  en  $\text{B}_2\text{O}_3$  gedoteerde kwartsglasfiber, gemaakt via de plasma-opdampmethode (7), geeft figuur 6. De absorptiebanden bij 720, 870 en 940 nm worden veroorzaakt door een geringe hydroxylconcentratie. Anderzijds heeft de dubbele-kroes methode het voordeel van een continu proces, waarmee men snel en wellicht goedkoop, grote lengten glasfiber kan vervaardigen.

### Besluit

Het onderzoek naar de vervaardiging van glasfibers voor optische communicatie houdt zich momenteel o.a. met de volgende onderwerpen bezig:

- verdere vermindering van het optisch verlies van zachtglasfibers;
- vergroting van de snelheid van het opdampproces;
- betere beheersing van het brekingsindexprofiel;
- bestudering van de mechanische eigenschappen van glasfibers en de invloed van kunststoflaagjes op deze eigenschappen.

De ontwikkeling van methoden voor het maken van lange glasfibers met klein optisch verlies en nauwkeurig beheerst brekingsindexprofiel is de afgelopen jaren zeer snel gegaan. Toch eindigt dit artikel voorzichtig. Uitvoerige praktijkproeven zullen moeten uitwijzen of de voordelen toegedicht aan optische communicatie inderdaad aanwezig zijn en of glasfiberkabels een voldoende betrouwbaar transmissiemedium vormen. Hierbij moet eraan herinnerd worden dat de glasfiber slechts één van de componenten van het systeem is en dat de problemen met de overige componenten (zoals de GaAs lichtbron) ook alle opgelost zullen moeten zijn.

### Literatuur

1. K. C. Kao, G. A. Hockham, Proc. IEE **133** (1966) 1151-1158.
2. Philips Technisch Tijdschrift, **36** (1976) nr. 7.
3. B. Scott, H. Rawson, Glass Technol. **14** (1973) 115-124.
4. Y. Ikeda, M. Yoshiyagawa, Second European Conference on Optical Fibre Communication, Parijs, september 1976.
5. H. M. J. M. van Ass, R. G. Gossink, P. J. W. Severin, Electronics Lett. **12** (1976) 369-370.
6. zie b.v. J. B. Mac Chesney, P. B. O'Connor, H. M. Presby, Proc. IEEE **62** (1974) 1280-1281.
7. P. Geittner, D. Küppers, H. Lydtin, Appl. Phys. Lett. **28** (1976) 645-646.

### Erratum

In het artikel 'Het vervaardigen van glascapillairen' door C. de Graaf, is een fout geslopen. In de formules op blz. 256 van het decembernummer zijn helaas de worteltekens weggefallen. U dient daar dus te lezen:

$$d = \sqrt{\frac{D^2}{x}}$$

en acht regels lager

$$d = \sqrt{\frac{8^2}{32}} = 1,4 \text{ mm } \varnothing \text{ uitwendig}$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{5^2}{32}} = 0,9 \text{ mm } \varnothing \text{ inwendig.}$$

Hiernaast, op blz. 16, vindt U het vervolg van de examenopgaven 'Koudglasbewerken Primaire Beroepsopleiding' als voortzetting van blz. 259 van het decembernummer van Mikroniek