

Hoofdstuk 3 : FIBERS

3.1. Inleiding.

Licht kan op twee verschillende manieren gezien worden, namelijk als een golfverschijnsel of als een deeltjesstroom. Het verschijnsel licht is moeilijk vast te stellen daar we over geen meettoestellen beschikken om dit te meten. Het enige wat we van licht kunnen meten is de lichtintensiteit. Aan de hand van deze metingen kunnen een groot aantal andere metingen uitgevoerd worden, zoals bijvoorbeeld de afbuiging en de wisselwerking van licht met dezelfde golflengte, interferentie genoemd.

3.2. Basisprincipe van lichtgeleiding.

Om de lichtgeleiding in een optische fiber te bestuderen, gebruik makende van het golfverschijnsel model, is het belangrijk om de brekingsindex van het diëlectrische medium te bestuderen. Deze is gedefinieerd als de verhouding van de lichtsnelheid in vacuüm tot de lichtsnelheid in het medium. Een lichtstraal zal sneller voortbewegen in een optisch dicht medium dan in een medium dat minder dicht is. De brekingsindex is een maat voor dit effect.

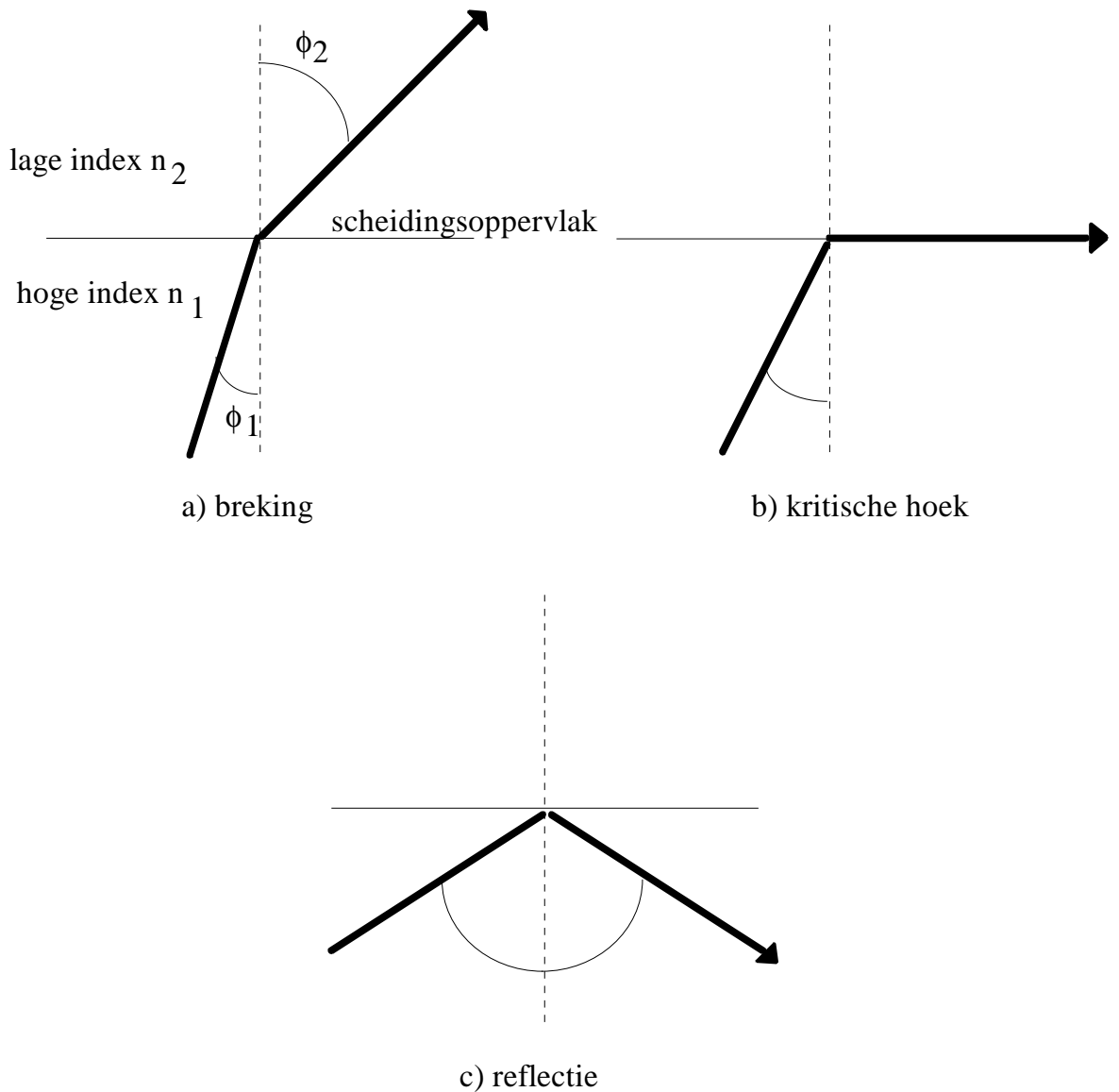
Een fiber is gemaakt uit een glasdraad (de 'core') waar de lichtstraal in gevangen zit, dankzij een omhulling (de 'cladding') waarvan de brekingsindex kleiner is dan deze van de core. Als een lichtstraal tegen de scheidingswand komt tussen deze twee lagen zal er een breking optreden zoals geïllustreerd in figuur 3.1. De relatie tussen de in- en uitvalshoek en de brekingsindex, wordt gegeven door volgende vergelijking :

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2.$$

Er is een hoek ϕ_c waarvoor de uitvalshoek 90° is en dus de gebroken straal parallel met het scheidingsoppervlak tussen de twee lagen zal lopen (cfr. fig. 3.1. b). Dit is de kritische hoek waarvoor:

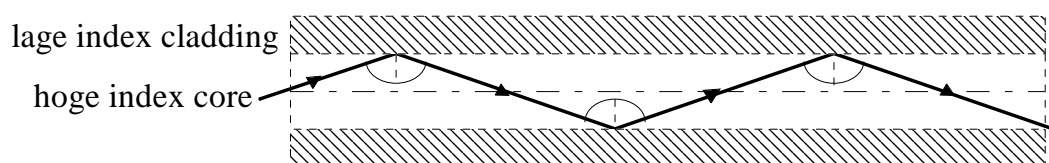
$$\sin \phi_c = n_1/n_2.$$

Voor hoeken groter dan deze kritische waarde wordt het licht weerkaatst in het diëlectricum waar het licht vandaan komt. (cfr. fig. 3.1. c).



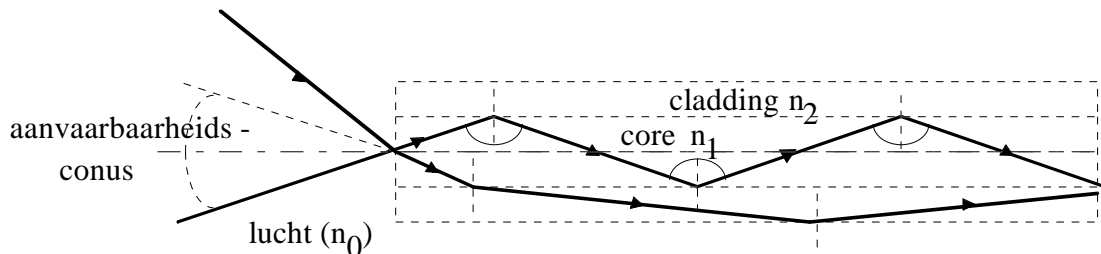
figuur 3.1. : lichtstraal bij overgang van hoge naar lage brekingsindex.

Door dit mechanisme kan men veronderstellen dat een lichtstraal, indien geïnjecteerd onder een voldoende grote hoek, door de fiber zal voortbewegen met zeer lage verliezen. De voortbeweging van een lichtstraal doorheen een fiber gebeurt door een opeenvolging van interne reflecties. Dit fenomeen wordt geïllustreerd door de volgende figuur.



figuur 3.2. : lichtgeleiding in een optische fiber

Daar enkel de stralen die een invalshoek hebben die groter is dan de kritische waarde, voortbewegen met totale reflectie, is het duidelijk dat niet alle stralen die in de core komen, zullen blijven bestaan over de volledige lengte van de fiber. Deze hoek wordt de aanvaardbaarheidshoek (ϕ_a) genoemd.



figuur 3.3. : numerische apertuur

Het is nu mogelijk van een relatie te vinden tussen de aanvaardbaarheidshoek en de brekingsindices van de drie media waarmee men te maken heeft (lucht, core, cladding) :

$$NA = n_o \sin f_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Deze relatie geeft de definitie van de numerische apertuur (NA) van een fiber, een term waarvan het gebruik veel ruimer ligt. Ze is zeer nuttig om de lichtgeleidingseigenschappen van een fiber te kunnen meten. Op deze term zal verder in deze tekst dieper worden ingegaan.

3.3. Classificatie van fibers.

Kenmerkend voor een glasvezel is het materiaal waaruit ze gemaakt is. De basismaterialen voor glasvezels zijn plastic en siliciumdioxide (SiO_2). Hierbij onderscheidt men de volgende types :

-*All Plastic Fiber (APF)* --> zowel cladding als core zijn van plastic

-*Plastic Clad Silicium (PCS)* -->glasvezel met plastic mantel

-*Silicium Clad Silicium (SCS)* -->zowel cladding als core zijn van glas (Si)

Het basismateriaal voor "*All Plastic Fibers*" bestaat zowel voor de kern, als voor de mantel, uit plastic. De fiber heeft een kerndoorsnede van ca. 1 mm. Kenmerkend is de lage prijs en het gemak bij het aansluiten, omwille van de eenvoudige plastic connectoren en de eenvoudige zenders en detectors.

De nadelen van deze fiber zijn de grote demping en de lage bandbreedte. Omwille van deze nadelen is deze fiber enkel geschikt beneden de 15 Mbps en beneden 100 m transmissielengte.

Bij "*Silicium Clad Silicium*" fibers bestaan zowel de core als de cladding uit glas (Silicium). Deze fibers hebben betere geleidingseigenschappen, doch een hogere prijs.

De "*Plastic Clad Silicium*" fibers zijn een tussenoplossing. De core is gemaakt uit glas, terwijl de mantel (cladding) uit plastic bestaat. De fibers hebben eigenschappen die ergens tussen deze van de vorige twee fibersoorten in liggen.

Naast een onderscheid in materialen kan men glasvezels ook indelen naar het lichtgeleidingsprincipe :

-*Multimode Step Index* (MSI)

-*Multimode Graded Index* (MGI)

-*Single mode Step Index* (SSI)

golflengte	0,7 - 0,9 μm	1,2 - 1,4 μm	1,4 - 1,6 μm
demping	2 - 5 dB/km	0,5 - 1,5 dB/km	0,2 - 0,5 dB/km
step index	20 MHz .km	200 MHz .km	200 MHz .km
graded index	200 MHz .km	2 GHz . km	2 GHz . km
single mode	2 GHz . km	20 GHz . km	20 GHz . km
plastic vezel :	0,5 - 0,7 μm	150 - 600 dB/km,	20 MHz

tabel 3.1. : *prestaties van diverse glasvezels*

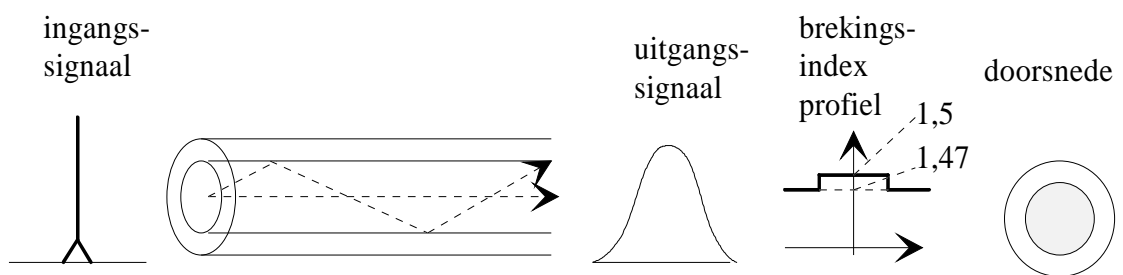
3.3.1. Multimode step index fibers

De multimode step index fiber wordt vooral gebruikt voor korte afstanden. In deze fiber is de brekingsindex van de core (n_1) constant en groter dan die van de cladding (n_2).

Het grootste nadeel van step index fibers is de lage bandbreedte. De hoofdreden hiervoor is dat modes met een kleinere invalshoek ϕ een grotere vertraging hebben. De lichtstralen worden met een verschillende hoek gereflecteerd en volgen een zigzag weg doorheen de fiber. Ze leggen bijgevolg verschillende afstanden af en komen dus bij het uiteinde aan op verschillende tijden. Dit verschil in propagatietijd wordt bestudeerd met de "modale dispersie" (zie verder).

core diameter	cladding diameter	N.A.	Attenuatie bij 850 nm	Bandbreedte
100 μm	140 μm	0,3	5 - 12 dB/km	20 MHz x km

tabel 3.2.: *typische parameters v.e. step index fiber*



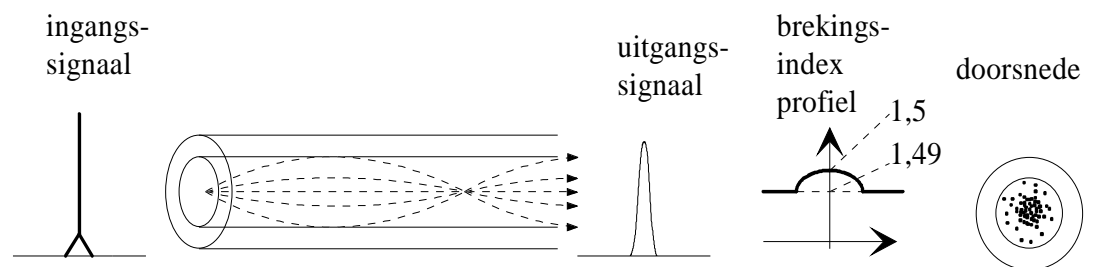
figuur 3.4. *eigenschappen van een step index fiber*

3.3.2. Multimode graded index fibers

In deze fiber stijgt de core brekingsindex gradueel van de cladding naar het midden toe, met een paraboolvormig profiel. De hoge orde modes zullen langzamer voortbewegen, terwijl buiten de centrale as, waar de brekingsindex kleiner is, de snelheid zal vergroten. Op deze manier wordt het snelheidsverschil tussen de lage en de hoge orde modes kleiner dan voor step index fibers.

core diameter	cladding diameter	N.A.	Attenuatie	Bandbreedte
50 μm	125 μm	0,2	3 dB/km (850 nm)	1 GHz x km
			0,6 dB/km (1300 nm)	

tabel 3.3. : *typische parameters v.e. graded index fibre*



figuur 3.5. *eigenschappen van een graded index fibre*

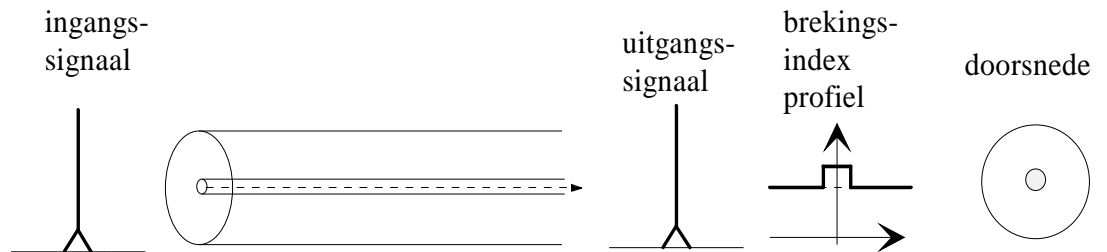
3.3.3. Monomode fibers

Als men bij de stepindex fiber de core diameter zeer klein maakt (5 tot 10 μm), kan er slechts 1 mode¹ door de fiber voortbewegen. Het voordeel van met slechts 1 mode te werken in een optische fiber is dat de dispersie, veroorzaakt door de verschillen in propagatietijd tussen de verschillende modes, kan vermeden worden.

core diameter	cladding diameter	N.A.	Attenuatie (bij 1300/2550 nm)	Bandbreedte
9 μm	125 μm	0,1	0,5 - 0,25 dB/km	100 GHz x km

tabel 3.4. : *typische parameters v.e. monomode fibre*

¹Een mode is een gegevensdrager, wanneer er maar 1 mode kan doorgezonden worden kan deze dus niet gemoduleerd worden met andere signalen.



figuur 3.6. eigenschappen van een monomode fibre

3.4. Transmissiekenmerken van optische fibers

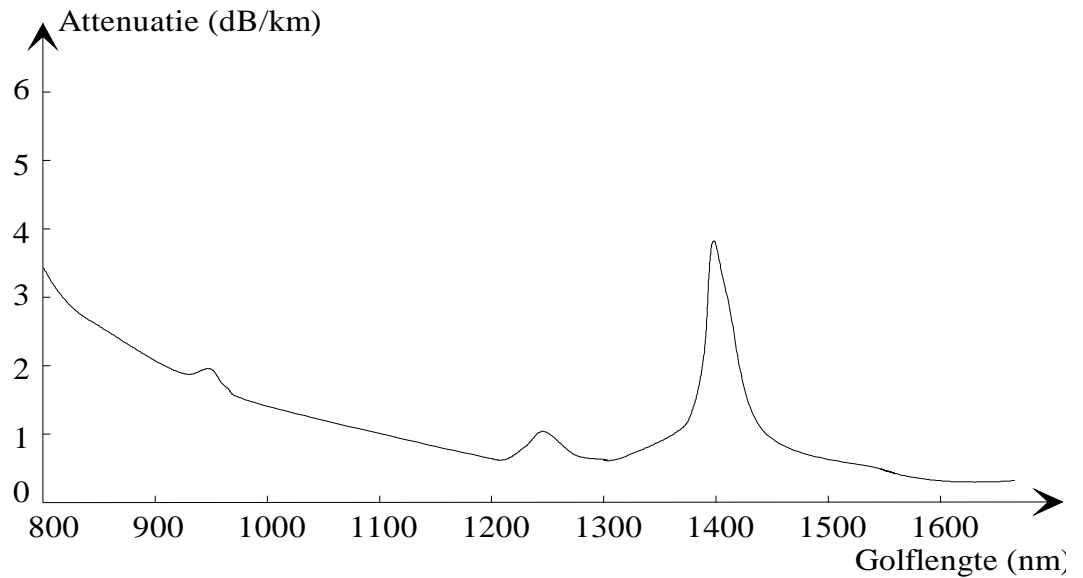
3.4.1. Attenuatie

Attenuatie wordt meestal uitgedrukt in decibels. De optische verliezen van een bepaalde golflengte worden bepaald door de verhouding van het ingaand optisch vermogen P_i in de fiber, tot het uitkomende optische vermogen P_o .

$$\alpha_{(dB)} = 10 \log_{10} (P_i / P_o)$$

Deze attenuatie wordt veroorzaakt door drie effecten : strooiing, absorptie en afbuiging.

- Strooiing wordt veroorzaakt door microscopische onzuiverheden van de brekingsindex van het glas. Een lichtstraal wordt hierdoor gedeeltelijk uitgestrooid in vele richtingen. Bijgevolg is er een deel van het licht verloren gegaan. Dit effect is verantwoordelijk voor 90 % van de totale attenuatie en verkleint met stijgende golflengte.
- Absorptie wordt veroorzaakt door ongewenste materialen in de fiber. Water is hiervan de belangrijkste. Zij veroorzaakt pieken in het optische verlies bij 1,25 en 1,39 μm .
- Voor afbuiging kunnen twee types onderscheiden worden. Enerzijds is er de microafbuiging, te wijten aan microscopische imperfecties in de vorm van de fiber. Anderzijds onderscheidt men macroafbuiging, veroorzaakt door de bochten die de fiber maakt.



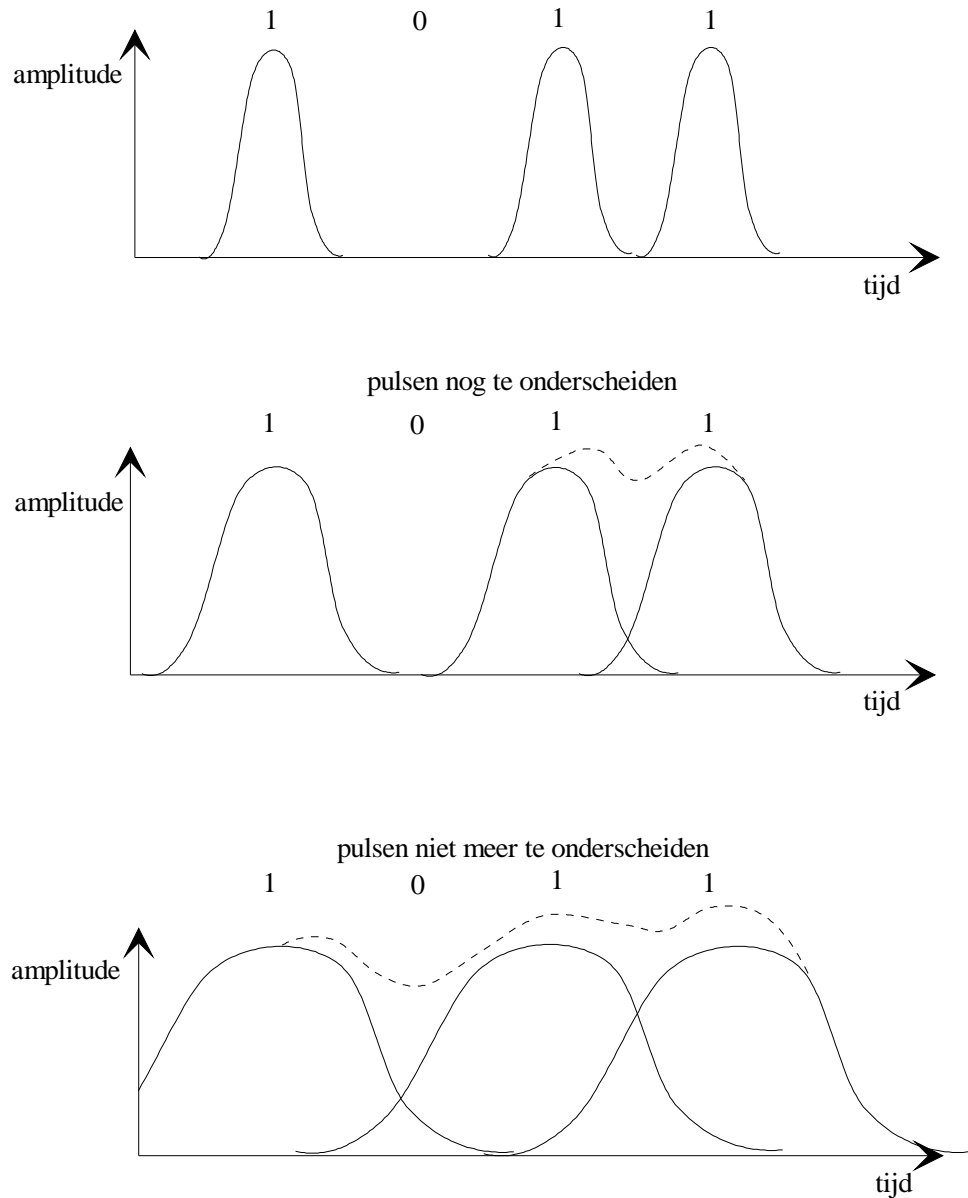
figuur 3.7. : fiber attenuatie i.f.v. de golflengte

Fiber Type	Attenuatie	Attenuatie	Attenuatie
	850 μm	1300 μm	1550 μm
Step index	5 - 12 dB/km		
Graded index	3 - 5 dB/km	0,5 - 0,7 dB / km	
Monomode		0,4 - 0,6 dB / km	0,2 - 0,3 dB/km

tabel 3.5. : typische attenuatie voor fibers

3.4.2. Bandbreedte.

Dispersie veroorzaakt storingen voor zowel digitaal als analoog overgedragen signalen doorheen een fiber. Hierdoor verbreden de pulsen die overgezonden worden. Dit fenomeen wordt geïllustreerd in de onderstaande figuur, waar men duidelijk kan zien dat de pulsen verbreden en hierdoor gaan overlappen met hun burens. Dit kan zover gaan dat ze niet meer te onderscheiden zijn door de ontvanger.



figuur 3.8. : bandbreedte

De bandbreedte van een fiber wordt in het tijdsdomein meestal gekarakteriseerd door de pulsverbreding of door dispersie. Twee eigenschappen zijn de oorzaak van de dispersie: multimode dispersie (of intermodale dispersie) en chromatische dispersie (of spectrale dispersie).

Multimode dispersie beschrijft de pulsverbreding, veroorzaakt door het verschil in propagatietijd van de verschillende modes, in de veronderstelling dat de lichtbron zuiver monochromatisch² is.

² Monochromatisch licht is éénkleurig, m.a.w. van één enkele golflengte.

Chromatische dispersie is een pulsverbreding door de eindig spectrale breedte van de bron, waar er slechts één mode doorheen de fiber zal bewegen.

Multimode fibers worden meestal gekarakteriseerd door hun multimode dispersie en chromatische dispersie. Voor monomode fibers is de multimode dispersie nagenoeg nul, zodat de bandbreedte enkel gekarakteriseerd wordt door de chromatische dispersie.

3.4.3. Multimode of intermodale dispersie

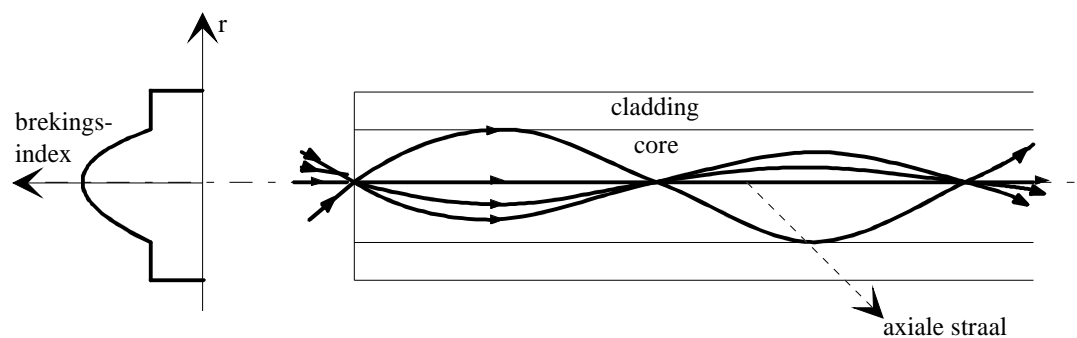
Pulsverbreding door intermodale dispersie wordt veroorzaakt door de verschillen in de verplaatsingssnelheid tussen de modes van een multimode fiber.

Als de verschillende modes, die bestaan uit pulsen, zich doorheen de multimode fiber met verschillende snelheden verplaatsen, zal de pulsbreedte aan de uitgang afhankelijk zijn van de transmissietijd van de traagste en de snelste mode. Voor een step index fiber is dit verschil groot, waardoor men een grote pulsverbreding bekomt.

Voor een graded index fiber is de situatie anders. De transmissiesnelheid van het licht in de core is er omgekeerd evenredig aan de brekingsindex. In onderstaande figuur blijkt dat de lichtstralen, die parallel aan de centrale as van de core lopen, een kortere weg afleggen dan de andere stralen. De snelheid echter, is door de kleinere brekingsindex groter voor de hogere orde modes dan voor de lagere orde modes.

In de graded index fibers kan de intermodale dispersie verminderd worden door een optimaal brekingsindex profiel te nemen, zeer dicht bij een parabolische vorm.

Voor monomode fibers is er geen intermodale dispersie, omdat er slechts één mode door de fiber loopt.



figuur 3.9. : *multimode dispersie*

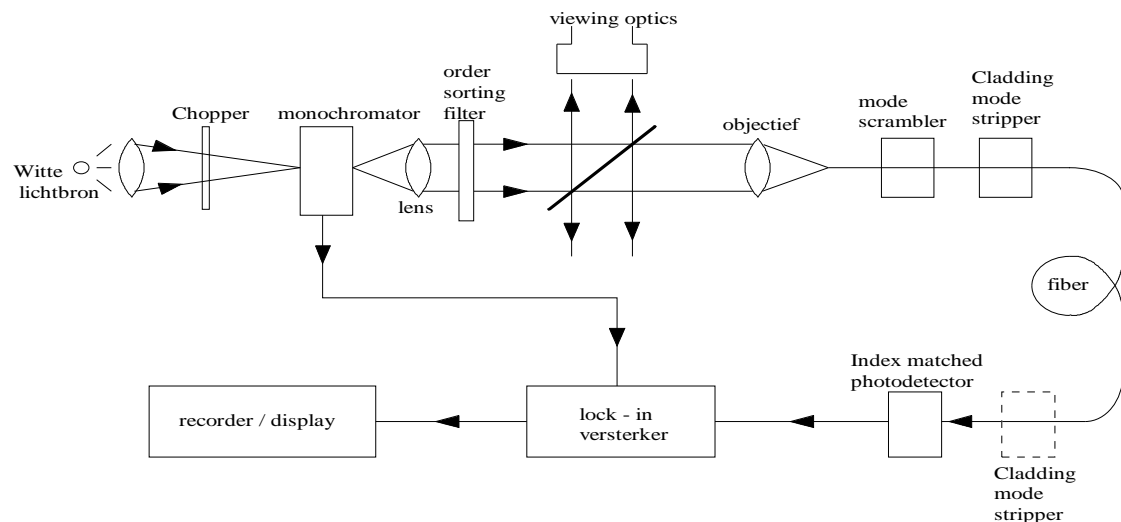
3.4.4. Chromatische of intramodale dispersie

Chromatische dispersie kan in alle types optische fibers optreden en is het gevolg van de eindige spectrale lijnbreedte van de optische bron. Omdat een optische bron nooit juist één enkele frequentie uitzendt, maar een band van frequenties, is het mogelijk dat er vertragingstijden optreden tussen de verschillende spectrale componenten.

3.5. Metingen op glasvezels en kabels.

3.5.1. Spectrale attenuatie.

De verliezen van vezels, in functie van de golflengte, worden gemeten met behulp van de volgende meetopstelling :



figuur 3.10. *spectrale attenuatie meting*

Men maakt gebruik van een witte lichtbron (halogeenlamp of xenon booglamp), omdat in deze lichtbron alle golflengtes van het licht aanwezig zijn.

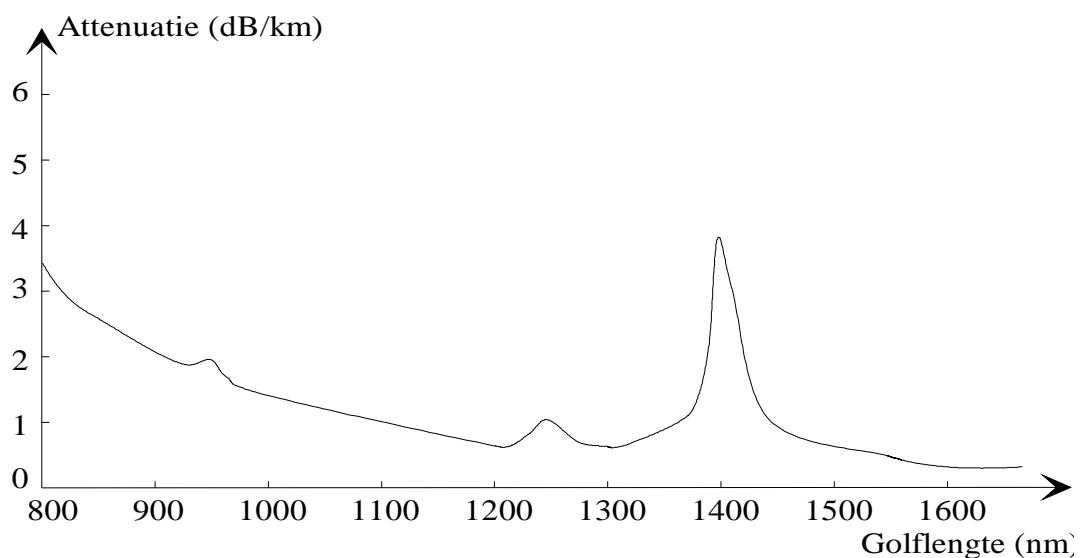
Het licht wordt via de chopper op een frequentie van enkele honderden hertz gebracht. Dit maakt het mogelijk voor de "lock-in versterker", aan de ontvangtzijde, een synchrone detectie te realiseren. Het gepulste licht wordt door een monochromator gestuurd, zodat er slechts het gewenste smalle spectrum via het lenzensysteem in de vezel gestuurd wordt. Er kan een beam splitter ingelast worden voor de fiber om een referentiesignaal in te voegen. Hierdoor kunnen de fluctuaties van de uitgangsspanning gecompenseerd worden. De cladding modes kunnen in de mantel van de vezel toch een bepaalde lengte (enkele honderden meters) afleggen. Deze modes in de mantel zouden

een vals beeld van de verliezen kunnen opleveren. Daarom wordt een mode scrambler en een cladding mode stripper ingelast, om een evenwichtige input te krijgen. Als we de monochromator het ganze spectrum laten doorlopen (800 nm tot 1600 nm), verkrijgen we telkens een bepaald vermogen voor elke golflengte. Het optische vermogen wordt aan het uiteinde gedetekteerd door een PIN fotodiode. De elektrische uitgang van deze diode wordt in de lock-in versterker gestuurd, waarvan de uitgang wordt opgenomen.

Om een referentie te kunnen hebben, worden dezelfde metingen nog eens uitgevoerd op een stukje vezel van ongeveer 3 m. De verliezen per golflengte kunnen nu berekend worden door deze twee metingen te vergelijken.

$$\alpha_{(\text{dB})} = 10 \log_{10} (P_i / P_o)$$

Als we dit uitrekenen voor elke golflengte, bekomen we de spectrale attenuatie curve.



figuur 3.11. : spectrale attenuatie curve

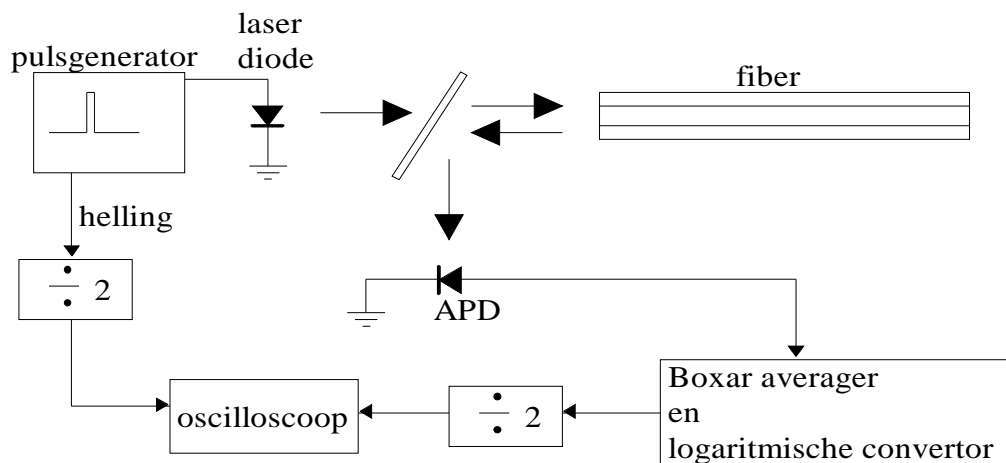
3.5.2. Optische tijds domein reflectometrie (OTDR)

Deze meettechniek, ook wel de backscattering meetmethode genoemd, wordt zeker het meest uitgevoerd op glasvezels. Deze metingen geven immers zeer snel een vrij duidelijk beeld van de optische verliezen die in de glasvezel optreden. In dit opzicht is deze methode beter dan de gewone spectrale attenuatiemetingen, hierboven besproken. Ze maakt het mogelijk om de verliezen in splices en connectoren te meten, evenals de plaats waar er fouten in de geleider optreden. Het grote voordeel van deze techniek is het feit dat ze wordt uitgevoerd aan slechts één zijde van de fiber, zonder de uitgang te

moeten bereiken. Ze worden uitgevoerd in elke fase van het productieproces, zelfs na de installatie. OTDR is een zeer sterke techniek voor veldmetingen op fibers (metingen ter plaatse op een geïnstalleerde geleider).

De strooi-effecten geven een afbuiging aan de microscopische onzuiverheden van het glas. Deze meettechniek bestaat erin licht in de vezel te injecteren en de optische intensiteit van de terugkerende golf op te meten.

Een typische OTDR opstelling wordt in de onderstaande figuur gegeven. Een puls-generator stuurt een laserdiode, die optische pulsen (van 10 mW of meer) in de fiber stuurt. De pulsbreedte varieert van nanoseconden tot milliseconden, terwijl de frequentie gaat van 1 kHz voor lange fibers, tot 20 kHz voor kortere fibers. De frequentie moet zo gekozen worden dat het terugkerende signaal, het ingestuurde signaal niet gaat overlappen. Een lange puls geeft meer energie, wat metingen op langere kabels mogelijk maakt, terwijl een kortere puls een betere resolutie geeft aan de meetresultaten. Het terugkerende signaal wordt van het oorspronkelijke signaal gescheiden door een halfdoorlaatbare spiegel. De detectie gebeurt meestal door een avalanche fotodiode. Het bekomen signaal wordt versterkt om gemeten te kunnen worden.

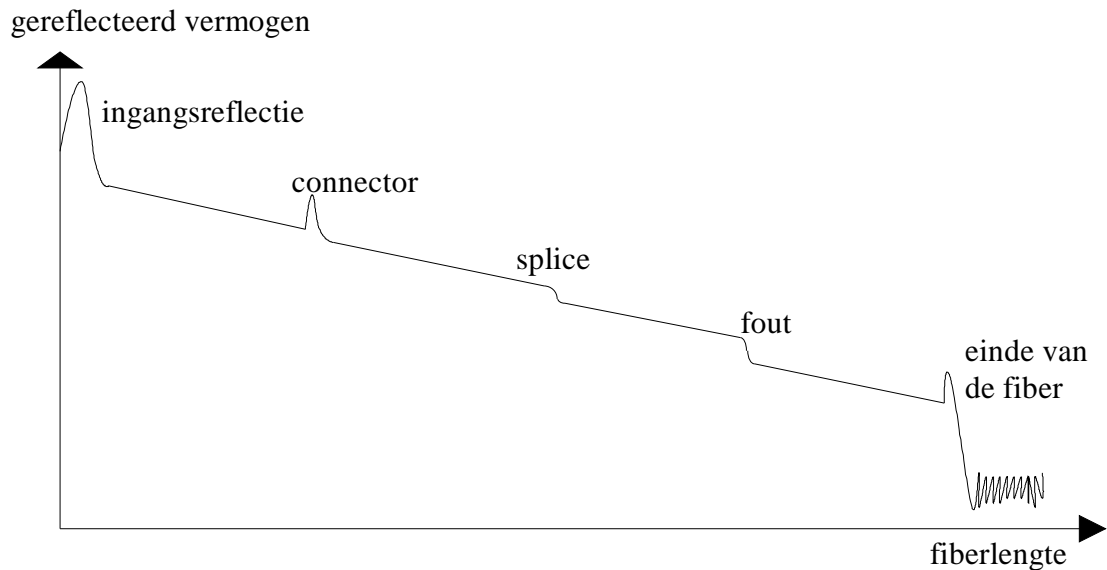


figuur 3.12. : OTDR principiële opstelling

De 'boxcar averager' verbeterd de signaal / ruis verhouding. Het signaal wordt weergegeven in logaritmische vorm. De delers (deling door 2) zijn nodig om een attenuatie weer te geven in één richting (voor één maal de lengte) en dit voor zowel de horizontale, als de verticale as.

Een voorbeeld van een meetresultaat wordt weergegeven in onderstaande figuur. Hierin ziet men duidelijk een eerste puls, veroorzaakt door de reflecties van de

ingangconnector. Daarna volgt er een lange dalende lijn, veroorzaakt door de strooiing van het signaal dat door de geleider gaat. Er zijn eveneens pulsen zichtbaar, veroorzaakt door reflectie, komende van het uiteinde van de fiber. Discontinuïteiten bij een splice³ geven eveneens een puls. Fouten in de fiber geven grote verliezen.



figuur 3.13. : OTDR - meetresultaat

Het uiteinde van de fiber is herkenbaar aan een puls, veroorzaakt door de Fresnelreflectie⁴ op het uiteinde van de fiber.

Het resultaat van deze meting geeft de attenuatie per lengteëenheid, door de helling van de curve te berekenen over de gewenste lengte. De locaties van verliezen door juncties, splices of fouten kunnen gevonden worden door de vermogensverliezen aan de posities van de verbinding.

De totale lengte van de fiber kan berekend worden door het tijdsverschil tussen de in- en uitgang van het signaal.

3.5.3. Dispersie metingen.

Dispersie metingen geven een beeld van de storingen op de optische signalen, als ze door de fiber voortbewegen. Een vertragingstoring beperkt de informatie die kan

³ Een splice is een verbinding van twee glasvezeluiteinden zonder gebruik te maken van connectoren.

⁴Fresnelreflectie is de reflectie van een deel van het signaal, wanneer deze het eindvlak van de fiber kruist, door de verschillende brekingsindex aan elke zijde van het vlak.

overgedragen worden (capaciteit). Hierdoor is de dispersie, na de attenuatie, de belangrijkste karakteristiek voor een optische vezel. Er zijn twee methodes om de bandbreedte van een fiber te karakteriseren. De dispersieeffecten kunnen gekarakteriseerd worden door metingen te doen op de impulsresponsie van de fiber in het tijdsdomein, of door de basisbandfrequentie respons op te meten in het frequentiedomein.

De meest gebruikte methode voor metingen van de pulsresponsie in optische fibers is de tijdsdomein meting. Men stuurt korte pulsen (100 tot 400 ps) in de fiber komende van een bron, die gebruik maakt van snelle elektronische elementen. De pulsen gaan door de fiber en worden verbreed door verscheidene dispersiemechanismen. Deze pulsen worden gedetecteerd door een hoge snelheidsfotodetektor (avalanche fotodiode) en worden gevisualiseerd met een snelle sampling oscilloscoop.

Men zal dan, na de eerste meting van de pulsbreedte van de uitgang, de lange fiber vervangen door een kortere fiber (1 à 2 m) en de metingen herhalen, zodat men een referentie bekomt. De fiber dispersie bekomt men uit deze twee pulsbreedtes.

Deze techniek wordt gebruikt voor korte fibers (tot 2 km) en als men aan de beide zijden van de fiber aankan, op dezelfde plaats.

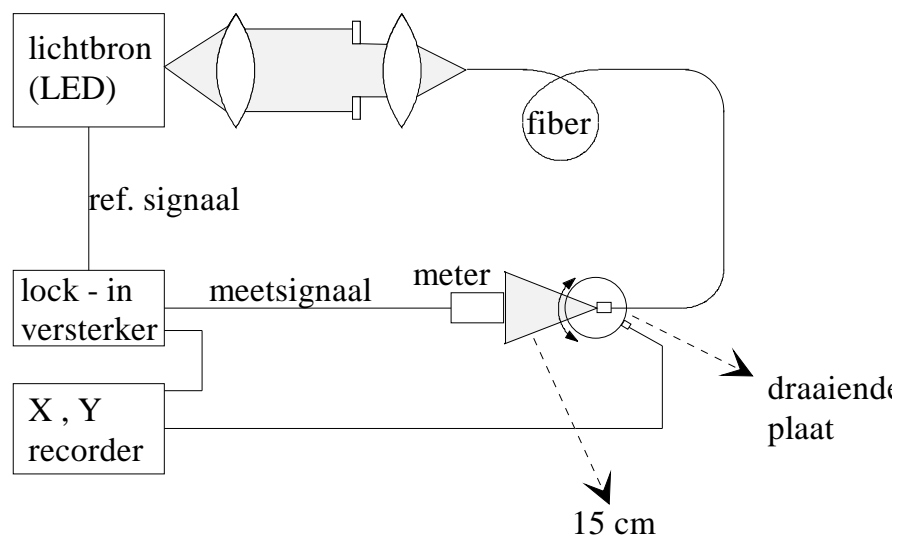
Voor lange fibers gebruikt men beter de meetmethode in het frequentiedomein. Deze metingen kan men op twee manieren uitvoeren. Er kan gewerkt worden met pulsen of met sinusoidale golfvormen.

Indien men werkt met pulsen, is de opstelling dezelfde als in het vorige geval. De sampling oscilloscoop zal echter vervangen worden door een spectrum analyzer. Een vergelijking van het uitgangsspectrum met het ingangsspectrum geeft ons de frequentierespons.

Als men werkt met een sinusoidale golfvorm stuurt men een sinusoidaal gemoduleerd signaal in de fiber op verschillende uitgekozen frequenties, gebruik makende van een 'sweep oscillator'. We verkrijgen dan een continu beeld van de frequentierespons. De bandbreedte van de vezel bekomen we door te kijken naar het optisch 3 dB punt (dit betekent 6 dB elektrisch).

3.5.4. Numerische apertuur.

De numerische apertuur is belangrijk, omdat ze bepaalt hoeveel modes er in de vezels zullen aanwezig zijn. Het is een materiaaleigenschap die afhangt van het verschil in brekingsindex tussen de mantel en de kern. Men kan de numerische apertuur opmeten door gebruik te maken van de far field methode.



figuur 3.14. : far field methode

In de vezel worden alle mogelijke modes gebracht m.b.v. een speciale lichtbron (LED). Het eindoppervlak van de testvezel wordt op een roterend vlak geplaatst, zò dat het vezeleinde in de as van de roterende plaat staat. Voor elke hoek wordt het vermogen opgemeten met een "spot meter" op een afstand van 10 tot 20 cm. De numerische apertuur is nu gelijk aan de hoek, waarvan men een vooraf bepaald verlies (bijvoorbeeld 10 %) t.o.v. het vermogen met een hoek 0, heeft bekomen.

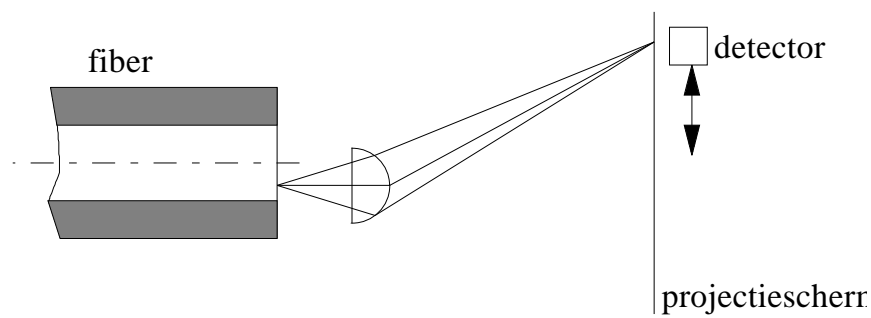
3.5.5. Meting van het brekingsindexprofiel

Men kan de brekingsindexprofielen nameten op volgende methodes :

- interferometrisch
- near-field scanning
- eindreflectie

De methode van de eindreflectie, maakt gebruik van de Fresnelreflectie aan het uiteinde van de vezel. Een lichtstraal wordt immers gebroken aan de glas-lucht overgang. Men kan dan, met de wet van Snellius de brekingsindex berekenen op de plaats waar de lichtstraal aan deze overgang gebroken wordt. Als men dit voor elk punt van het vezeleindoppervlak doet, bekomt men het brekingsindexprofiel.

De near-field methode maakt gebruik van een LED. Vergelijkbaar met de near field optische vermogensmeting wordt de intensiteitsdichtheid gemeten. Dit geeft ons een idee van het brekingsindexprofiel. De principiële werking kan gehaald worden uit de volgende figuur.



figuur 3.15 : *near - field methode*

Interferentie microscopen zijn een wijd verspreide methode om brekingsindexen te meten. Deze techniek vereist echter wel de preparatie van een dun schijfje vezel, waarvan de beide eindvlakken zorgvuldig gepolijst zijn. Bij de Mach-Zehner methode stuurt men licht door het schijfje vezel. Het verschil in looptijd, dat te wijten is aan het verschil van de brekingsindexen, zal er voor zorgen dat een interferentiepatroon ontstaat, met het licht dat rechtstreeks (via halfdoorlaatbare en gewone spiegels) van de lichtbron afkomstig is. De verschuiving van de interferentiefrenjes is een maat voor de verschuiving van de brekingsindex.

3.6. Kabels

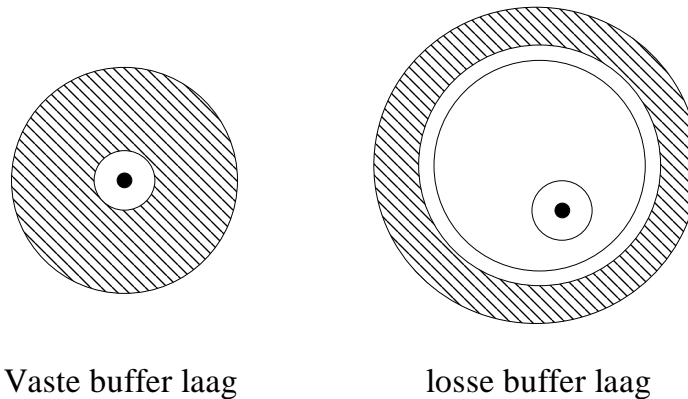
Als men de optische verbindingen ziet als alternatief voor de elektrische transmissie, is het belangrijk dat de kabels op een veilige manier kunnen geïnstalleerd en onderhouden worden. Daarom zullen de mechanische eigenschappen van kabels die in een werkomgeving geïnstalleerd worden van primair belang zijn. De belangrijkste functies van fibers kunnen onderverdeeld worden in vier hoofdgroepen:

- *fiber protectie* : Het belangrijkste doel hiervan is de optische kabel te beschermen tegen beschadiging of breuk, gedurende zowel de installatie als het gebruik van de fiber.
- *Stabiliteit van de transmissiekenmerken* : De bekabelde fiber moet stabiele transmissiekenmerken hebben, die vergelijkbaar zijn met de niet-bekabelde fiber. Verhogingen van de optische attenuatie, te wijten aan de bekabeling, zijn vrij gewoon en moeten geminimaliseerd worden bij het ontwerp van de kabel.
- *Kabelsterkte* : Optische kabels moeten vergelijkbare mechanische eigenschappen hebben aan de elektrische transmissiekabels, opdat ze op dezelfde manier kunnen behandeld worden. Dit houdt ondermeer in : spanning, torsie, druk, buiging, ...
- *Identificatie en aansluiting van de fibers in de kabel* : Dit is vooral belangrijk voor kabels die bestaan uit een groot aantal optische fibers.

3.6.1. Fiber buffering.

De fiber krijgt een eerste bekleding bij de productie, om een eerste beschermlaag te vormen voor de fiber. Deze primaire bekleding krijgt een tweede, ook buffer-, beschermlaag genoemd, om de fiber te beschermen tegen externe mechanische invloeden. Deze bufferlaag is ontworpen om de fiber te beschermen tegen verliezen ten gevolge van microbuiging en kan verscheidene vormen aannemen.

- De aansluitende laag bestaat meestal uit harde plastic en heeft direct contact met de primaire beschermlaag.
- Een losse bufferlaag is een breder buisje waarin de fiber zit en die de fiber mechanisch isoleert.



figuur 3.16. : fiber buffering

3.6.2. Structurele en sterkte onderdelen.

Een structureel deel is meestal in de optische fiber begrepen om als fundament te dienen rond dewelke de gebufferde fibers gewonden worden, of waarin de fibers gestoken worden.

De sterkte onderdelen worden rond de structurele aangebracht. Zij geven een goede mechanische protectie en temperatuurstabiliteit. Men gebruikt hiervoor meestal elementen zoals Polyethyleen, Kevlar, FRP, ...

3.6.3. Kabelschild en waterafscherming.

De kabels worden normaal omhuld met een plastic schild. Indringing van water kan voorkomen worden door de openingen in de kabel te vullen met componenten zoals siliconerubber of een petroleumgelei.

3.7. Verbindingen.

Het is uiteraard belangrijk om verbindingen te maken met lage verliezen. Er zijn verschillende oorzaken voor de optische verliezen. Eerst is er de Fresnel reflectie, die ontstaat waar het licht een oppervlak kruist tussen twee media met verschillende brekingsindex. Bij elke connectie hebben we de overgang glas-lucht-glas. Op deze plaatsen wordt er een deel van het licht terug in de geleidende fiber weerkaatst.

Naast deze Fresnelreflectie kent men nog enkele andere oorzaken van verliezen, die te wijten zijn aan het feit dat men onmogelijk de uiteinden van de fibers perfect kan alligneren. Verder zullen alle afwijkingen van de geometrische en optische eigenschappen van de kabels, verliezen veroorzaken. Zo kunnen bijvoorbeeld optreden bij :

- verschillen in diameter van de core en/of de cladding.
- verschillen in numerische apertuur en/of brekingsindex.
- verschillen in de brekingsindex profielen.
- fiberfouten (zoals een elliptische core, ...).

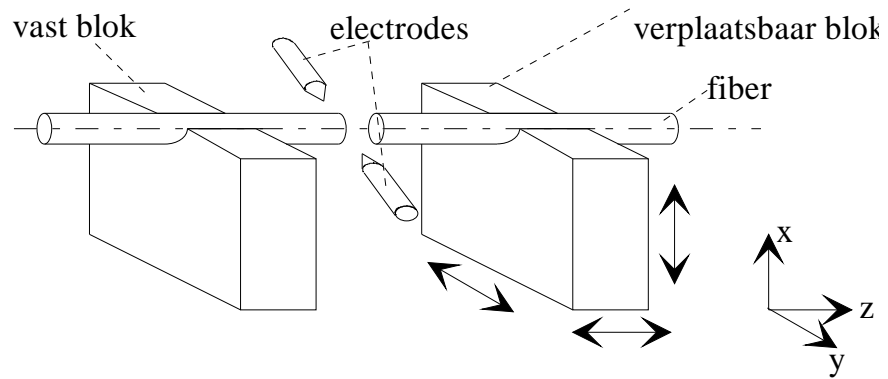
Er bestaan twee grote categorieën voor de fiberverbindingen :

1. Fiber splices : deze zijn semipermanente of permanente verbindingen die vooral gebruikt worden in de meeste optische fiber telecommunicatie systemen.
2. Fiber connectoren : Dit zijn wegneembare verbindingen die het toelaten van gemakkelijk manueel snelle verbindingen te maken met fibers. Een voorbeeld hiervan zijn de ST-connectoren, die voor de toepassing van dit werk gebruikt worden.

3.7.1. Fiber splices.

Hierin bestaat nog een onderscheid tussen de fusie splices en mechanische splices.

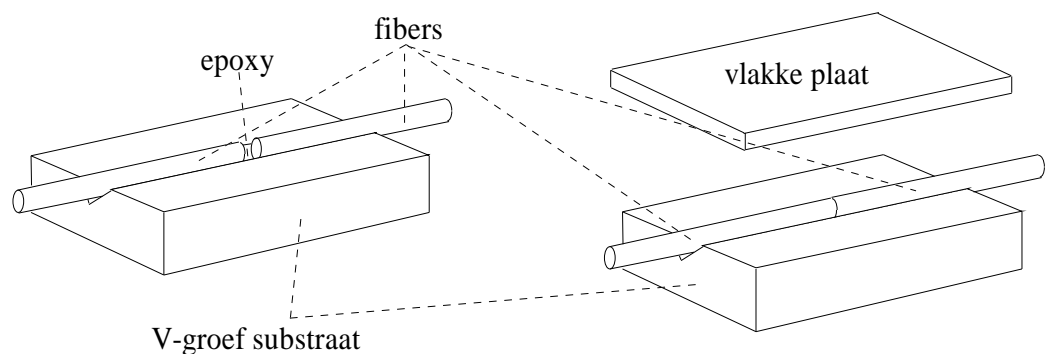
Fusie splices worden verkregen door de overgang tussen de gealligeneerde fibers te verhitten (door een vlam of een elektrische boog). Hierdoor zullen de fibers plaatselijk smelten. Het is hier belangrijk om de fibers eerst te strippen en goed te positioneren (alligneren). Een schematisch diagram van een elektrische boogfusie is weergegeven in de volgende figuur. Men kan hier de elektrodes zien die zorgen voor de boog. Een vast blok houdt het ene fiberuiteinde op zijn plaats, terwijl men het andere uiteinde in een verplaatsbaar blok legt. De fibers worden gepositioneerd en vastgehouden door middel van kuisende microscopische schroeven. Met deze techniek kan men een splices maken met een verlies van 0,1 dB.



figuur 3.17. : *fusie splices*

Mechanische splices kunnen op verschillende manieren gemaakt worden. Een algemene methode maakt gebruik van een nauwkeurig ontwikkelde tube waarin de klaargemaakte fiberuiteinden permanent verbonden worden. Normaal gebruikt men hiervoor een glazen of keramische tube, met een interne diameter die juist groot genoeg is om er de fiber in te leggen. Er wordt een transparante lijm toegevoegd om een mechanische verbinding te bekomen.

Een andere algemene techniek maakt gebruik van een V-groef waarin twee klaargemaakte fibers worden geperst. Een veel gebruikte versie is de "elastomerische" splice. In dit geval zijn de V-groef en het andere lid gemaakt van polyester. Zij vormen een driehoekig buisje waarin de fiber zit en door een lichte laterale druk vanzelf geallieerd wordt. Deze techniek is vrij eenvoudig, vergeleken bij de fusie splicing en wordt daarom vrij veel gebruikt.



figuur 3.18. : *mechanische splices*

3.7.2. Connectoren.

Verbreekbare fiber connectoren zijn moeilijker te maken dan fiber splices. Dit komt doordat ze vergelijkbare eigenschappen moeten hebben met de splices, maar terzelfder tijd ook moeten wegneembaar zijn. De connector moet ook toelaten om regelmatig verbroken en verbonden te kunnen worden zonder problemen te veroorzaken wat betreft de fiber alignering. Om een goede werking te verkrijgen is het tevens nodig om de fiberuiteinden te beschermen tegen beschadigingen die kunnen optreden bij het gebruik.

Samenvattend kunnen we stellen dat een connector aan de volgende punten moet voldoen:

- de fiberuiteinden beschermen en positioneren.
- de fiberuiteinden alligneren om zo een optimale optische koppeling te bekomen.
- de verbinding en de alignering onderhouden, de uiteinden beschermen tegen de omgeving en een zekere sterkte geven aan de verbinding.

De fiber connectoren kunnen onderverdeeld worden in twee grote groepen : de "butt jointed" en de "expanded beam" connectoren.

3.7.2.1. Butt jointed connectoren.

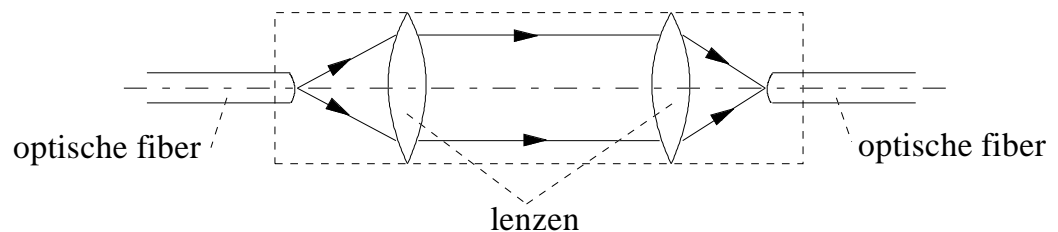
Dit is de meest gebruikte vorm van connectoren. De twee fibers die moeten verbonden worden zijn vast verbonden in metalen pluggen, gekend onder de naam 'ferrules' die een centrale opening hebben in hun eindoppervlakken waar de gestripte fiber in zit. In de connector worden de twee ferrules in een aligneringsgleuf geplaatst die het mogelijk maakt de fiberuiteinden te verbinden. Het is belangrijk dat de oppervlakken van de uiteinden glad en loodrecht op de fibras zijn. Dit kan verkregen worden door de uiteinden te polijsten. Typische concentriciteitsfouten tussen de core en de buitendiameter van de ferrule geven een verlies van 1 à 2 dB. Dit kan verlaagd worden door de fibercore te centreren in de ferrule. zo verkrijgt men verliezen van 0,3 à 0,5 dB.

Het invoegverlies is de belangrijkste parameter bij optische connectoren. Bij single mode connectoren is echter, door het gebruik van laserdiodes, het terugkeerverlies (het verlies doordat een deel van de lichtstraal terugkeert) zeer belangrijk. Een voorbeeld van een single mode connector is de diamant connector. In dit geval wordt de

alignering verkregen door een excentrische V-groef in het uiteinde van de ferrule te persen. Op deze manier kan de laterale offset onder de 5 μm gehouden worden.

3.7.2.2. Expanded beam connector.

Een alternatief voor de directe verbindingen tussen optische fibers, is de expanded beam. Een fiberconnectie die volgens deze methode werkt is geïllustreerd in de onderstaande figuur. De connector bestaat uit twee lenzen voor het parallel maken en het focuseren van de lichtbundel van het ene fiberuiteinde naar het andere. Het gebruik van deze methode maakt de laterale alignering veel minder kritisch dan bij de butt jointed connector.



figuur 3.19. : expanded beam connector

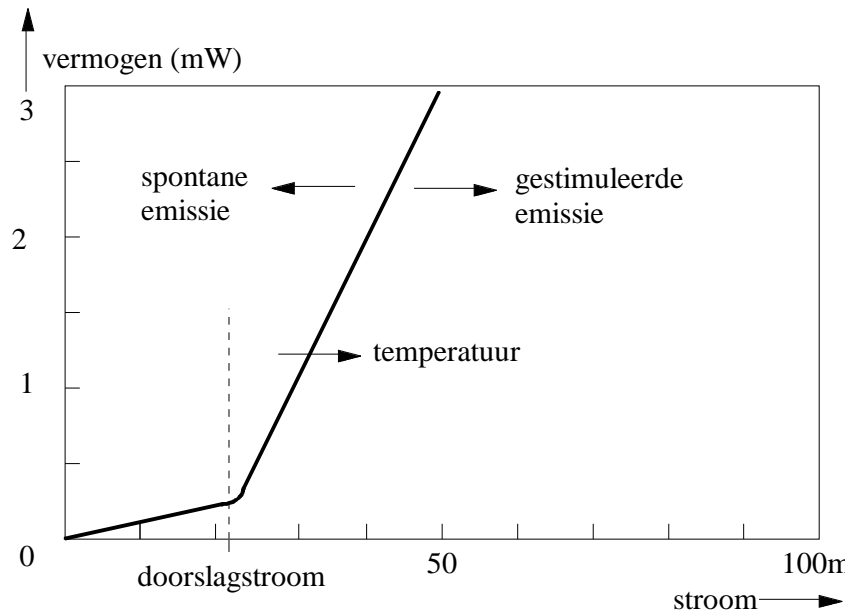
3.8. Optische bronnen

De optische bron wordt dikwijls beschouwd als de actieve component in een optische fiber communicatie systeem. Zijn hoofdfunctie is het converteren van elektrische energie naar optische energie. Er zijn twee types van optische lichtbronnen voorhanden :

- Monochromatische incoherente bronnen (LED: Light emitting diodes)
- Monochromatische coherente bronnen (lasers)

3.8.1 De laser.

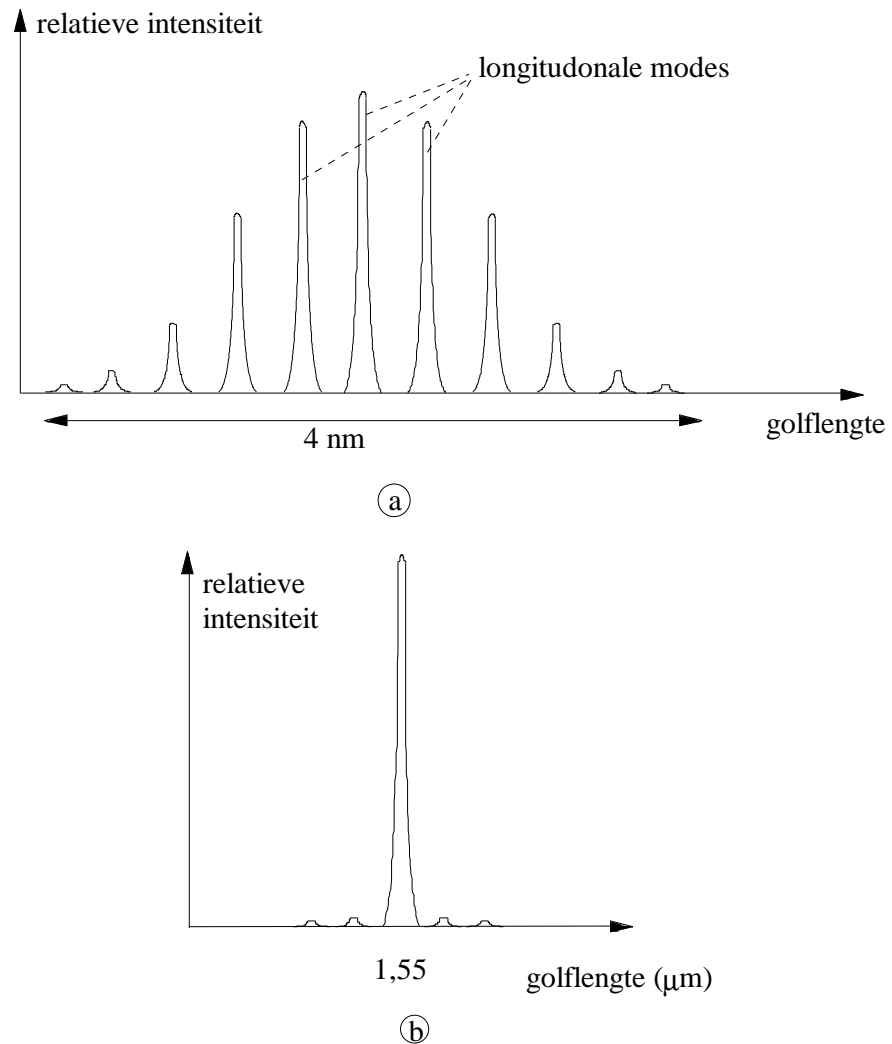
Een typische karakteristiek voor een halfgeleider laser is de vermogen versus stroom karakteristiek zoals in volgende figuur.



figuur 3.20 : laserkarakteristiek

In de figuur is de doorslagstroom aangeduid. Men kan duidelijk zien dat het toestel slechts een klein uitgaand lichtvermogen geeft, onder de doorslagspanning. Dit komt overeen met de zone van spontane emissie, eigen aan het toestel. Eenmaal de doorslagstroom bereikt is, stijgt het optische vermogen sterk bij kleine stijgingen van de stroom door het toestel. Dit komt overeen met de zone van gestimuleerde emissie, wanneer het toestel werkt als een versterker van licht.

Het optische uitgaande spectrum voor een multimode laser is weergegeven in figuur 3.21.a. Het bestaat duidelijk niet uit één enkele golflengte, maar uit een serie van golflengtepieken, overeenkomstig met de verschillende modes. Deze pieken worden meestal gescheiden door enkele tienden van een nanometer. Voor een single mode laser mag de optische uitgang slechts één enkele longitudinale en één enkele transversale mode hebben. Bijgevolg is de spectrale breedte van de emissie voor een single mode smaller, zoals afgebeeld in figuur 3.21.b.



figuur 3.21. :*spectrum laser diodes*

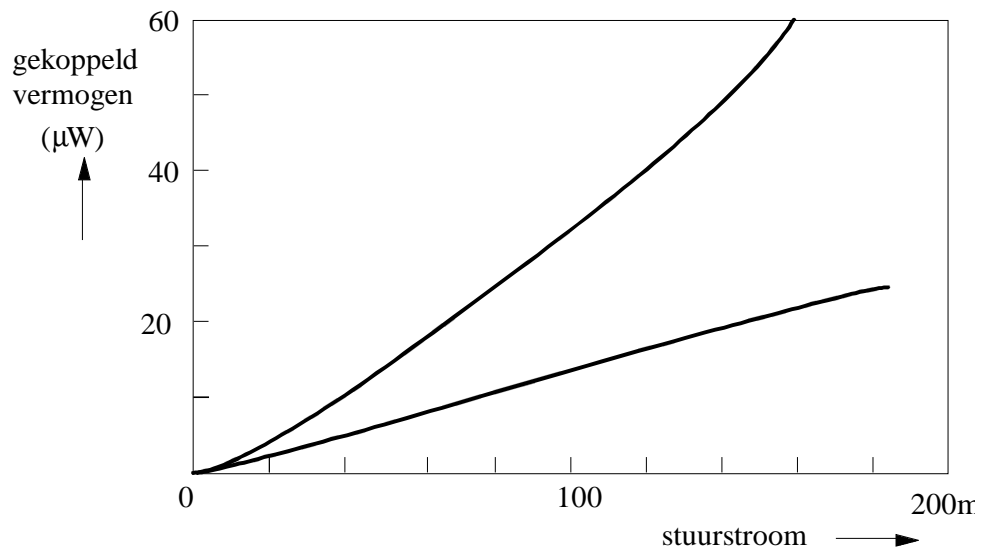
Typische data voor laserdiodes zijn :

- Maximum vermogen : 10 mW
- Doorslagstroom : 30 mA
- Spectrale breedte : 2 à 5 nm
- Modulatie bandbreedte 1 GHz

3.8.2. LED (Light Emitting Diode)

Bij een LED is er enkel een spontane lichtemissie. De afwezigheid van optische versterking door gestimuleerde emissie in de LED leidt tot een beperking van de interne quantum doeltreffendheid van het toestel. Een typische karakteristiek voor het uit-

gaande optische vermogen versus de stroom voor een LED is getekend in volgende figuur.



figuur 3.22. : *LED karakteristiek*

Hierin zien we dat er bij de LED geen doorslagspanning is.

Typische data voor een LED zijn :

- Maximum vermogen : $50 \mu\text{W}$
- Spectrale breedte : 40 nm
- Modulatie bandbreedte : 100 MHz

De huidige LEDs hebben enkele nadelen t.o.v. de lasers, zoals :

- de algemeen lagere optisch gekoppeld vermogen in de fiber.
- de relatief kleine modulatie bandbreedte
- de harmonische vervorming.

Alhoewel deze problemen op het eerste gezicht de LED veel onaantrekkelijker maken als optische bron, dan de laser, heeft dit toestel een aantal interessante voordelen. Deze voordelen geven de LED een vooraanstaande plaats in de optische fiber communicatie.

Deze voordelen zijn o.a. :

- een eenvoudige constructie
- de kost. De eenvoudige constructie van de LED leidt tot een sterk verminderde kostprijs.
- betrouwbaarheid. De LED is veel ongevoeliger aan degradatie dan de laser.
- kleinere temperatuursgevoeligheid. De karakteristiek voor het uitgaande licht versus de stroom is veel minder beïnvloedbaar door de temperatuur dan de overeenkomstige karakteristiek van de laser. Bovendien is de LED geen doorslagcomponent zodat een stijging van de temperatuur geen stijging geeft in de doorslagstroom boven het werkingspunt.
- eenvoudige stuurcircuits.
- lineariteit.

Deze voordelen hebben van de LED een veel gebruikte optische bron gemaakt voor communicatie toepassingen.

3.8.3. De door ons gebruikte bron.

We besloten te werken met een diode i.p.v. met een laser als optische bron (cfr. hoofdstuk 5 : beslissingsdiagram). Nu kwam het er op aan een keuze te maken tussen de verschillende beschikbare bronnen. Onze keuze viel op de HFE 4020 van Honeywell (ingebouwd in een ST-behuizing met RS stock nr. 194 - 414). Daar deze diode een frequentiebereik heeft van 85 MHz, is deze component geschikt voor onze toepassing. De ST behuizing maakt deze component uitermate geschikt voor het gebruik op de luchthaven, waar de ST-connectoren standaard gebruikt worden. De HFE 4020 is een hoge stralings LED die geoptimaliseerd is voor het gebruik bij kleine fiber core diameters. Bij een voorwaartse stroom van 10 tot 100 mA werkt deze diode in haar lineair gebied (zie datasheet in bijlage C2). Deze stroom is niet te groot, zodat onze bron niet te sterk wordt belast. Als men de diode wil gebruiken bij hoge temperaturen, moet men de thermische weerstand mee in rekening brengen.

3.9. Detectors

De detector is een essentiële component voor een optische fiber communicatie. Het is een van de cruciale elementen die de algemene systeemprestaties bepaalt. Zijn taak bestaat erin het ontvangen optische signaal weer om te zetten naar een elektrisch signaal, dat dan versterkt wordt voor verdere behandeling. Daarom zal, als men de attenuatie onderzoekt langs de verbinding, de systeemprestatie bepaald zijn aan de detector.

De volgende criteria bepalen de belangrijke prestatie- en compatibiliteitsvereisten voor detectors die vrij analoog zijn aan die van de bronnen.

- Hoge gevoeligheid bij de gebruikte golflengtes. De eerste generatiesystemen hebben golflengtes tussen 1,8 en 0,9 μm . Er is echter een noemenswaardige verbetering verkregen in de tweede generatie detectors. Deze gebruiken golflengtes boven 1,1 μm terwijl de attenuatie en de dispersie verbeterd zijn.
- Hoge getrouwheid. Om een ontvangen signaal golfvorm te reproduceren, voor analoge transmissie, moet de responsie van de fotodetector lineair zijn voor een optisch signaal over een grote draagwijdte.
- Hoge elektrische responsie voor het ontvangen optische signaal. De fotodetector moet een maximaal elektrisch signaal geven voor een gegeven optisch vermogen.
- Korte responsietijd om een aanvaardbare bandbreedte te verkrijgen.
- Minimale ruis, geïnjecteerd aan de detector.
- Stabiliteits- en prestatiekenmerken. In het ideale geval moeten de prestatiekenmerken van de detector onafhankelijk zijn van omringende condities.
- Kleine afmetingen.
- Lage doorgangsspanning.
- Hoge betrouwbaarheid.
- Lage kost.

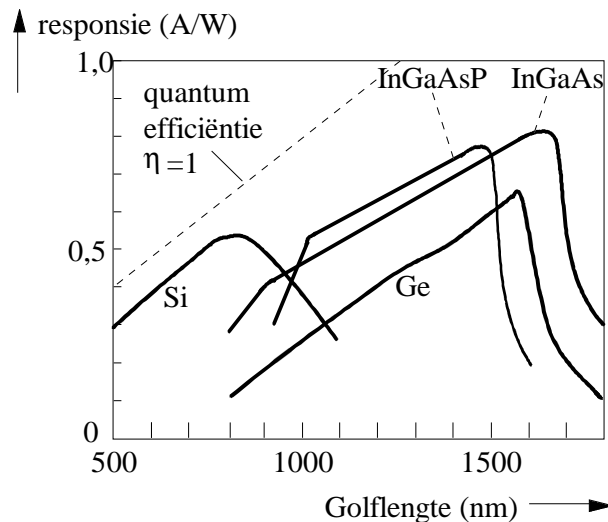
Twee componenten worden veel gebruikt :

1. De PIN-diode zonder interne versterking.

2. De avalanche fotodiode met interne versterking.

3.9.1. De PIN-diode.

De PIN-diode is het belangrijkste detectortype. Dit komt door zijn eenvoudigheid, stabiliteit en bandbreedte. Als de energie van een invallende foton groter is dan de bandgap energie van het materiaal, wordt de fotonenergie geabsorbeerd en wordt er een elektron -gat paar gegenereerd in de i-zone (intrinsieke zone, een zone met lage geleidbaarheid) van de diode. Een ideale fotodiode genereert één elektron-gat paar per foton. De fotonenergie is omgekeerd evenredig met de golflengte. Bij de cutoff golflengte is de fotonenergie kleiner dan de bandgap energie. In de normale constructie heeft men goed geleidende p- en n-zones rond de i-zone.



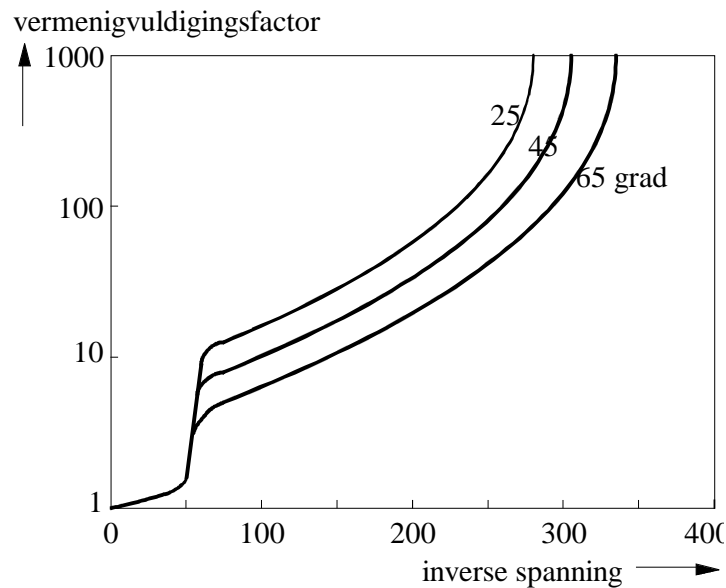
figuur 3.23. : *PIN diodes karakteristieken*

3.9.2. De Avalanche PhotoDiode (APD)

Door zijn inherente versterking, hebben de APD's een hogere effectieve responsies dan de PIN-diodes, wat hen aantrekkelijker maakt als communicatie ontvangers. De werking van een APD is vergelijkbaar met deze van een PIN-diode, waar de inherente fotonen worden geabsorbeerd en geconverteerd in elektron-gat paren. Het grootste verschil is de werking bij inverse doorslag, welke een drager vermenigvuldiging veroorzaakt.

De APD-diode heeft een complexere structuur dan de PIN-diode, dit om een zeer licht elektrisch veld gebied te creëren. Daarom is er evenals de verarmingslaag, waar de meeste fotonen geabsorbeerd en de primaire ladingdragers gegenereerd worden, een

zone met een hoog veld, waar de gaten en de elektronen voldoende energie kunnen krijgen om nieuwe elektron-gat paren te genereren.



figuur 3.24. : APD karakteristieken

3.9.3. De door ons gebruikte detector.

Onze keuze was beperkt omdat we gekozen hadden voor een analoog signaal, een signaalvorm waar vele detectors problemen mee hebben. De component die wij kozen is de HFD 3038 (analoog aan onze LED, ingebouwd in een ST-behuizing met RS stock nr. 194 - 486). Deze analoge PIN diode heeft het beste frequentiebereik uit de keuzen die we hadden. Het bereik van 125 MHz is ruim voldoende om de 10 MHz aan te kunnen. De andere componenten hebben een frequentiebereik dat te niet boven de 10 MHz uit komt, wat wel eens problemen zou kunnen geven voor de hoge precisie waar wij mee werken. Hij is ontworpen als een hoge snelheids, analoge optische ontvanger. Deze component werkt op 850 nm en is een goedkoop alternatief voor 1300 nm componenten. Een bijkomend voordeel is dat deze component kan gevoed worden met 5 V, zodat we geen bijkomend spanningsniveau moeten voorzien, wat de voedingsschakeling aanzienlijk vereenvoudigt. De voorversterking, die in de behuizing is ingebouwd, zet de uitgangsstroom van de PIN-diode om in spanning en versterkt deze. Hierdoor heeft de HFD 3038 een zeer kleine pulsbreedtestoring.

De voedingsspanning is normaal -5,2 V. Men kan echter ook een +5 V voeding gebruiken, maar men verliest dan aan prestatie bij snelheden onder 1 MHz. Dit is echter geen probleem voor ons, vermits wij met een 10 MHz signaal werken (zie

datasheet in bijlage C3). De uitgang varieert van de DC uitgangsspanning naar het V_{cc} potentiaal, wanneer licht aanwezig is op de optische ingang.

3.10. Voor- en nadelen van optische fiberverbindingen

3.10.1. Voordelen

1. **Bandbreedte** : De optische draagfrequentie (tussen 10^{13} en 10^{16} Hz) geeft een veel grotere potentiële bandbreedte dan metalen kabelverbindingen. Voor single mode fibers is een bandbreedte voorhanden van enkele GHz over tientallen kilometers kabel. Voor multimode fibers is de beschikbare bandbreedte enkele honderden MHz over een kabel van tien tot twintig kilometer. Hierdoor is duidelijk dat de optische fibersystemen veruit superieur zijn aan de koperen kabelsystemen. Ter vergelijking ; de verliezen in breedband coaxiale systemen beperken de transmissieafstanden tot enkele kilometers bij een bandbreedte van een honderd MHz.
2. **lage transmissieverliezen** : De ontwikkeling van de optische fibers is reeds zover dat men fiberkabels kan maken met een zeer lage attenuatie of transmissieverlies. Er zijn fibers ontwikkeld met transmissieverliezen van 0,2 dB/km (single mode bij 1550 nm). Dit vereenvoudigt het aanleggen van extreem lange communicatieverbindingen met extreem grote repeater afstand. (Het is nu mogelijk om te gaan tot honderd kilometers). Dit vermindert de kost en de complexiteit van de systemen.
3. **Kleine afmetingen en gewicht** : Optische fibers hebben een zeer kleine diameter (250 μm voor een fiber met beschermlaag) zodat het mogelijk is van kabels te maken met een diameter van 1 cm, waarin twintig optische fibers zitten.
4. **Elektrische isolatie** : Optische fibers zijn gemaakt in plastic of glas, welke elektrische isolatoren zijn. Daardoor kan men hiermee geen aardstromen of interferenties hebben. Verder is het, dank zij deze eigenschap, mogelijk van communicatieverbindingen te maken door een omgeving met sterke elektrische stoorvelden. De fibers zijn tevens ongevoelig voor blikseminslag.
5. **Ongevoeligheid aan interferentie en overspraak** : Optische fibers zijn ongevoelig aan elektromagnetische en radiofrequente interferentie. Verder is de strooistraling zò laag, dat regeneratie van de straling, die door de mantel verdwijnt, praktisch onmogelijk is. Er is dus geen optische interferentie tussen twee fibers zodat overspraak verwaarloosbaar is, zelfs als men de fibers in eenzelfde kabel legt.

6. Signaalbeveiliging : Het licht van een optische fiber straalt niet noemenswaardig uit, zodat het onderweg niet kan afgetapt worden. zo bekomt men een hoge graad van signaalbeveiliging.
7. Lage kost : Het glas dat instaat voor de optische geleiding is gemaakt van zand. Hierdoor is, in vergelijking met de koperen geleiders, de optische fiber een potentiële oplossing voor lage kost communicatieverbindingen.
8. Goedkope plaatsing : Het verschil in gewicht tussen coax en glasvezel, is zeker in het voordeel van de glasvezel (factor 20). Dit laag gewicht, gekoppeld aan de gereduceerde afmetingen, maakt een eenvoudige, en dus ook goedkope plaatsing mogelijk.

3.10.2. Nadelen :

1. Breekbaarheid van de fibers.
2. De kleine afmetingen geven soms problemen bij splicing of bij het aanbrengen van connectoren.
3. Problemen bij het verbinden van verschillende glasvezelkabels met lage verliezen, of het monteren van eindstukken op de vezels.
4. Een onafhankelijke elektrische voeding is nodig voor repeaters.
5. Testprocedures worden complex.

3.11. De te gebruiken fibers.

3.11.1 Specificaties van de beschikbare fibers en connectoren.

Over het luchthaventerrein is een netwerk aangebracht dat bestaat uit 60 fibers, zowel monomode als multimode. De voor ons belangrijkste karakteristieken hiervan zijn :

Voor de kabels :

- Volledig waterproof.
- Gebruikstemperatuur : -30 tot +70°C (voor de outdoor kabels).
- Gewicht : max. 100 g/m.
- Diameter : minimum 15 mm (voor de outdoor kabels).

Voor de glasvezels :

- Bruikbare golflengte van de vezels : 1300 nm.
- Monomode : step index
core/cladding diameter : 9-10/125 μm .
verzwakking : max 0.5 dB/km.
Bandbreedte : tot 5 GHz . km
- Multimode : graded index.
core/cladding diameter : 62.5/125 μm .
verzwakking : max 1,5 dB/km.
Bandbreedte : min 200 MHz . km

De kabels tussen de gebouwen bestaan uit één stuk. Er zijn geen repeaters of splices aanwezig, met uitzondering voor het monteren van de connectoren.

De connectoren zijn ST compatibele connectoren met een keved bayonet koppeling en hebben volgende eigenschappen :

De connectoren zijn gemonteerd door middel van een fusion splice die een verzwakking van maximaal 0.2 dB veroorzaakt.

3.11.2. De door ons gebruikte glasvezels.

Omdat de eigenschappen van multimode fibers in de 850 nm band voldoende goed zijn, en het gebruik van monomode fibers ernstige nadelen met zich meebrengt, maken wij gebruik van multimode vezels in de 850 nm band. Op deze beslissing wordt verder in deze tekst dieper ingegaan.

