

# Waarnemingen in het donker en weergave van warmtebeelden

Ronald Slegtenhorst en Jan Vermeiren  
Delft Sensor Systems B.V., Röntgenweg 1, 2624 BD Delft

## 1. Inleiding

Het is een oude droom van de mensheid ook in het donker te kunnen zien en meer tijd te kunnen gebruiken dan welke hem door de zonnecyclus wordt toegemeten of om de duisternis te kunnen doorbreken voor zijn eigen bescherming of comfort. Sinds de oertijd en de ontdekking van het vuur is er fundamenteel weinig veranderd: de lichtbronnen die de mensheid kan gebruiken hebben een uiterst beperkt vermogen en laten alleen maar toe om de directe omgeving van de verlichtingsbron te bekijken. Door gebruik te maken van projectiesystemen kan de energie in een lichtbundel geconcentreerd worden, waardoor de waarnemingsafstand drastisch wordt opgedreven; het nadeel van een dergelijke oplossing is dat slechts een heel klein deeltje van de omgeving verlicht is en men de bundel moet heen en weer bewegen om een vaag idee te krijgen van de omgeving. Iedereen, die 's avonds of 's nachts heeft moeten zoeken naar een kostbaar of dierbaar voorwerp kent die frustrerende gewaarwordingen.

Het is pas in de laatste decennia dat er vooruitgang is gemaakt en dat er technieken zijn ontwikkeld, die toelaten om 's nachts even goed en even comfortabel te zien als overdag. De eerste techniek is gebaseerd op de versterking van het aanwezige restlicht; de tweede op het gebruik van de infraroodstraling (IR) uitgezonden door alle voorwerpen op of nabij omgevingstemperatuur.

In dit artikel zullen een aantal toepassingen en vernieuwende concepten voor beide technieken worden besproken, zoals ze ontwikkeld zijn bij Delft Sensor Systems. In de kaderverhalen zullen de detectie-principes kort worden geschetst.

Delft Sensor Systems is ontstaan door het samengaan van de BU DI Electro-Optics in Delft en de Belgische BU OIP binnen de Delft Instruments (DI) groep. DI is ontstaan door de fusie van de Delftse bedrijven EN-RAF-NONIUS en Optische Industrie De Oude Delft (Oldelft). Dit concern is gespecialiseerd in het ontwerp, de realisatie en de verkoop van geavanceerde instrumentatie voor medische, technisch, wetenschappelijke toepassingen en voor defensie en ruimtevaart. Delft Sensor Systems legt zich toe op het ontwerp, de fabricage en de verkoop van hoogwaardige sensor (sub-)systemen in het golflengtegebied tussen het UV en het (verre) infrarood en dit voor defensie, ruimtevaart en industriële toepassingen.

## 2. De klassieke nachtkijker op basis van restlicht

Het doel van een dergelijke nachtkijker is om de minimale hoeveelheid restlicht, afkomstig van de maan of de sterren, zo efficiënt mogelijk op te vangen, te versterken en weer te geven. De voorkeur van de gebruikers gaat uit naar een instrument met een zo groot mogelijk gezichtsveld om zoveel mogelijk het 'tunnelzicht' te vermijden. De gebruikersgroepen voor dergelijke

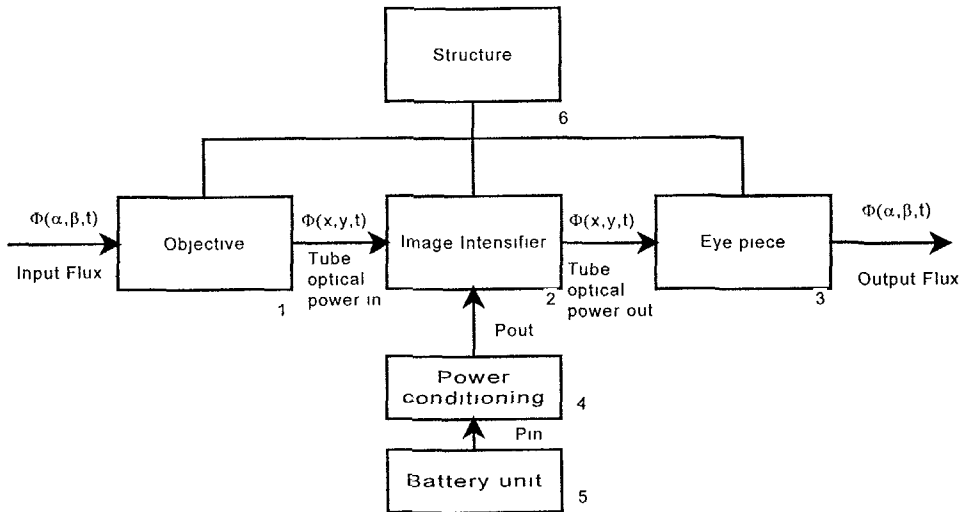
kijkers zijn o.a. defensie en politionele diensten, jagers en natuurobservators, de astronomie, scheepvaart en pleziervaart en allerhande donkere kamer toepassingen in de fotografische en optische industrie.

Handkijkers zijn uitermate geschikt voor kortstondig gebruik. Voor langere werkzaamheden moet de kijker met behulp van een geschikt draagmasker op het hoofd bevestigd worden en bijgevolg zijn de gewichtsvereisten zeer streng. Het gewicht van een kijker, zelfs lichter dan 0,5 kg, begint na enkele uren gebruik ernstig op de nekspieren te 'wegen'. Vandaar dat het ontwerp van dergelijke instrumentjes sterk wordt geoptimaliseerd en dat er ernstig wordt gezocht naar het reduceren van het gewicht. Het blokschema van een dergelijke kijker is weergegeven in Figuur 1; hij bestaat uit 4 modules: het objectief, de beeldversterkerbuis, het oculair, de schakelaar en de batterijen voor het voeden van de buis.

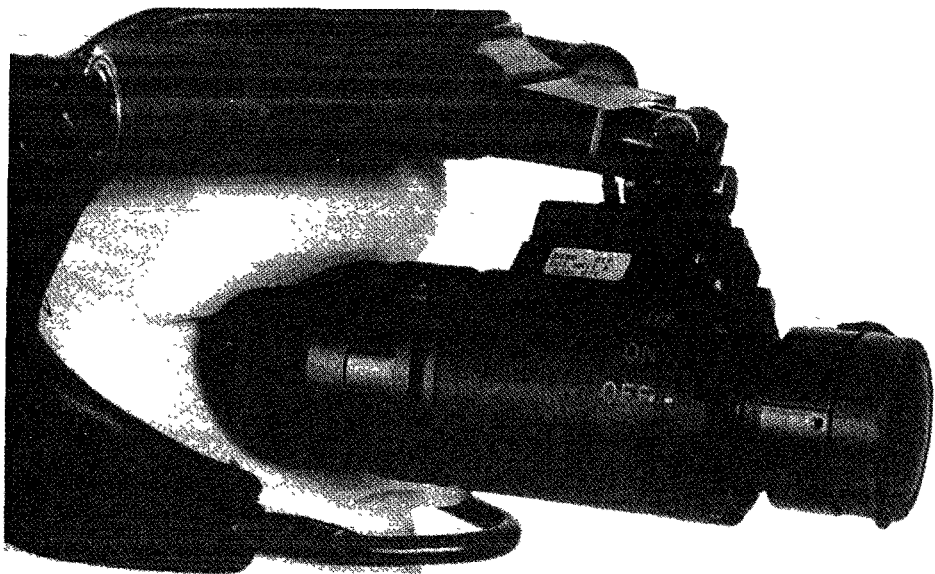
Het objectief bestaat meestal uit een ge-

modificeerde dubbel Gauss of Biotar configuratie, waarbij een zo hoog mogelijke lichtsterkte, samen met een zo groot mogelijk gezichtsveld en een groot spectraal bereik gevraagd worden. Om efficiënter gebruik te kunnen maken van het restlicht zal men in een dergelijke nachtkijker gebruik maken van het volledige golflengtegebied waarin de beeldversterkerbuis gevoelig is.

De beeldversterkerbuis is een hoogtechnologische hoogvacuum component. De werking hiervan staat beschreven in het eerste kaderverhaal. De afmetingen van de buizen zijn gestandaardiseerd en meestal bedraagt de nuttige diameter 18 mm. De meest gebruikte buizen hebben een geometrische versterking van 1: de afmetingen van het invallende beeld zijn gelijk aan die van het versterkte beeld. Afhankelijk van de configuratie wordt het versterkte beeld al of niet omgekeerd t.o.v. het invallende beeld. Naast de lichtversterkingsfactor en het gevoeligheidsgebied is de resolutie van de buis zeer belangrijk: gedurende de laatste jaren is de resolutie van 30 naar 38 lp/mm en op dit moment worden in



Figuur 1  
Blokschema van een kijker met helderheidsversterker



**Figuur 2**  
Lichtgewicht éénkanaals nachtzichtkijker, gedragen op een gezichtsmasker

een labo-omgeving buizen getest met resoluties tot boven 50 lp/mm.

Het laatste element in de optische keten is dan het oculair. Er is gekozen voor een loep, waarbij de pupil samenvalt met het uitgangsvlak van de lensgroep en waardoor een grote vrijheid in oogafstand ontstaat. Bovendien moet de loep de ingangsoopeningshoek van het objectief reconstrueren om een eenheids-vergroting van het systeem te bekomen. Het smalbandige licht, uitgezonden door de beeldversterkerbuis maakt het ontwerp iets makkelijker. Voor compacte toepassingen maakt Delft Sensor Systems gebruik van een gewijzigd Erfle oculair, waarbij de lensconfiguratie en de vorm van de ingangslens is aangepast aan de specifieke concave vorm van de beeldversterkerbuis. Tot openingshoeken van 40° kan de distorsie van de loep binnen redelijke grenzen gehouden worden. Bij grotere openingshoeken, moet een deel van de loepdistorsie opgevangen wor-

den door het introduceren van een compenserende distorsie in het objectief. Op dit moment werkt Delft Sensor Systems aan de ontwikkeling van een 60° objectief en loep.

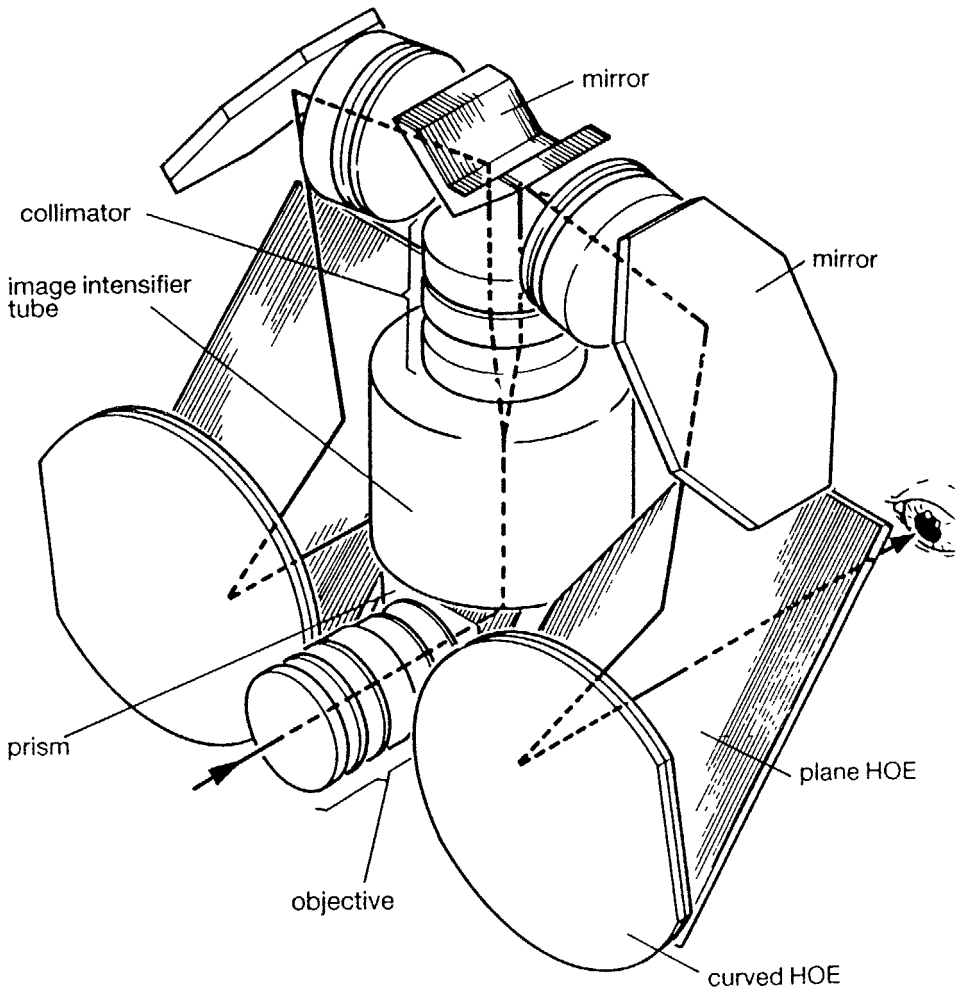
Een voorbeeld van een lichtgewicht monoscopisch kijkertje is gegeven in **Figuur 2**

### **3. Holografische nachtkijkers**

De hierboven beschreven nachtkijkers hebben voor de gebruiker twee beperkingen:

- als het lichtniveau plots sterk oploopt, satureert de beeldversterkerbuis en reduceert de functionaliteit van de kijker
- Het gebrek aan doorkijk- of langskijkmogelijkheden betekent een zware psychologische belasting voor de gebruiker.

Om deze beperkingen op te vangen is de holografische nachtkijker ontwikkeld: deze kijker projecteert het versterkte beeld over het normale gezichtsveld en afhankelijk



Figuur 3  
Werkingsprincipe van een holografische nachtkijker in 'cycloop' configuratie

van het belichtingsniveau neemt de gebruiker het directe dagbeeld waar of het versterkte nachtbild.

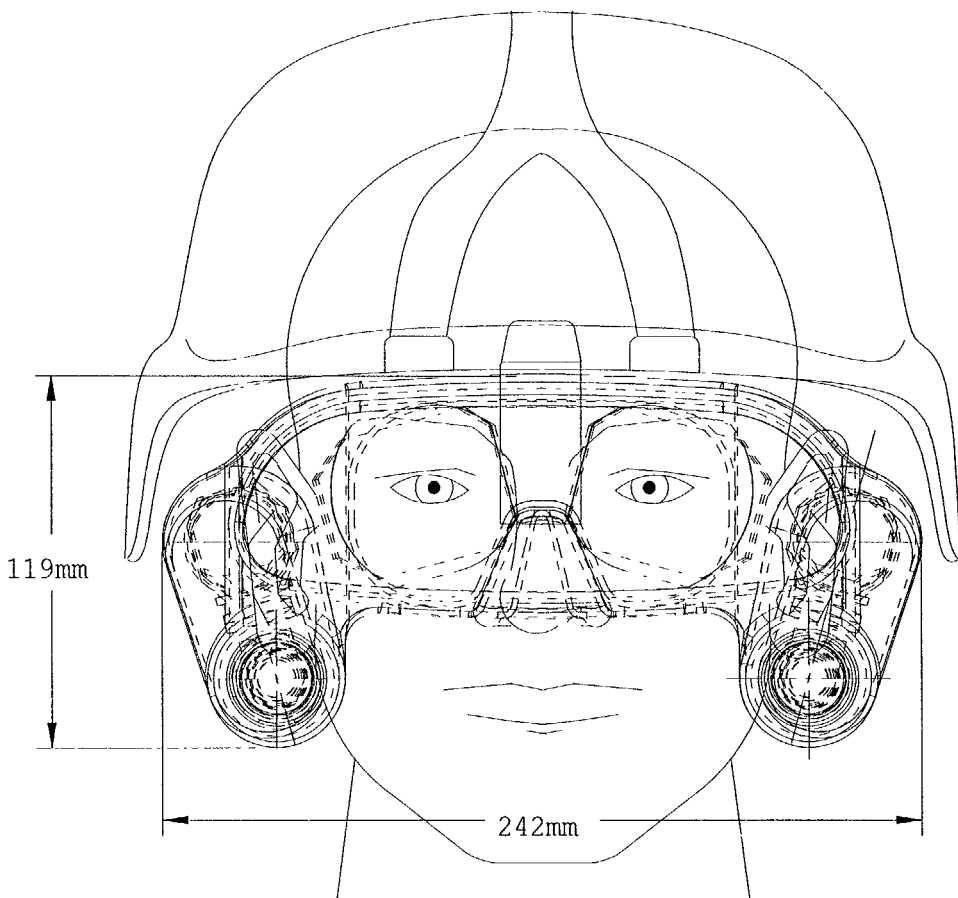
Een principe-schema van de holografische kijker HNV-1 is gegeven in Figuur 3. Bij een één-kanaalsuitvoering is het objectief geplaatst tussen beide ogen van de gebruiker. Na dit objectief met een lange beeldvlakafstand worden de stralen verticaal afgebogen naar de foto-cathode van de beeldversterkerbuis. Het versterkte beeld wordt via een beam splitter in het 'dak' van

de kijker verdeeld over het linker- en het rechterkanaal. Hierna volgt een projectiesysteem dat het beeld projecteert naar een collimatoropstelling. Daarvoor wordt het beeld eerst terug naar beneden geprojecteerd en naar voren afgebogen op een vlakke holografische plaat, die de functie vervult van richtingsgevoelige spiegel. Het licht wordt verder weerkaatst op een gebogen HOE (Holographic Optical Element), dat gebruikt wordt als collimator en daarna teruggestuurd naar het eerste HOE onder een andere invalshoek. Bij deze hoek laat

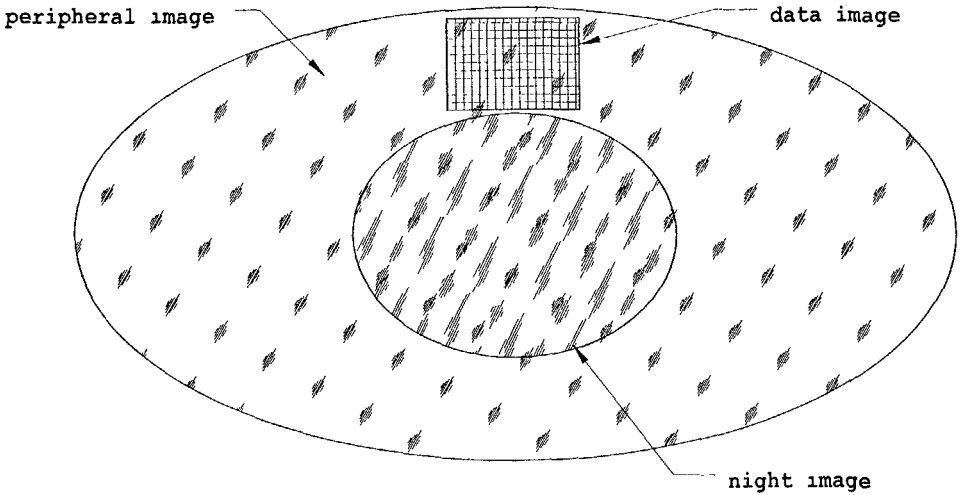
het HOE de stralen gewoon door. Beide HOE's hebben een heel grote kleurselectiviteit, waardoor de kleurwaarneming nauwelijks beïnvloed wordt door de HOE's

Door gebruik te maken van een collimator-opstelling is de vrije oogafstand zeer groot en kan de HNV-1 kijker makkelijk samen met een gewone bril gebruikt worden. De hierboven beschreven 'cycloop'-opstelling geeft de gebruiker voor afstanden groter dan 2 tot 3 meter een vrij goede diepteperceptie en bovendien laat de opstelling toe op korte afstanden een goede inschatting te maken van afstanden en onderlinge verhoudingen.

Op zeer korte afstand is de diepteperceptie van een mono-objectief systeem niet toereikend om accuraat afstanden te schatten en de nadering van een hand tot een object weer te geven. Daarom werkt Delft Sensor Systems op dit moment aan een stereoscopische oplossing (Figuur 4) HNV-3D. Door de optimalisatie van de optomechanische configuratie van beide objectieven kan men de hyperstereoscopieeffecten minimaliseren. Een stereoscopische opstelling geeft niet alleen een betere diepteperceptie, maar vergroot ook effectief de kijkhoek op korte afstanden, waardoor een aantal werkzaamheden veel comfortabeler



Figuur 4  
Concepttekening van een stereoscopische nachtzichtkijker



**Figuur 5**  
Plaatsing van de verschillende deelbeelden in het gezichtsveld van de operator van een nachtzichtkijker

kunnen uitgevoerd worden. De focussing van de objectieven wordt uitgevoerd in een master-slave benadering, waardoor de instelling van de HNV-3D met één hand kan gebeuren. De plaatsing van de elementen in het dak van de HNV-3D laat toe om een optioneel data-kanaal toe te voegen aan de kijker. Hierdoor kan de gebruiker gegevens of werkinstructies bekomen op een werkvlakgebied dat juist boven het beeld-in beeld gebied ligt (zie Figuur 5). Met deze nachtkijker wordt er een aanzet gegeven naar een grote uitbreiding van de gebruiksmogelijkheden van nachtzichtkijkers. Niet alleen is het mogelijk om routineopdrachten onder extreem lage lichtniveaus uit te voeren, maar de operator kan tijdens het uitvoeren van de werkzaamheden ook achtergronddocumentatie of procedures raadplegen.

#### 4. De Viper-3 pilotenhelm

Aan hulpmiddelen gebruikt door piloten en meer specifiek voor helicopter- en straal-

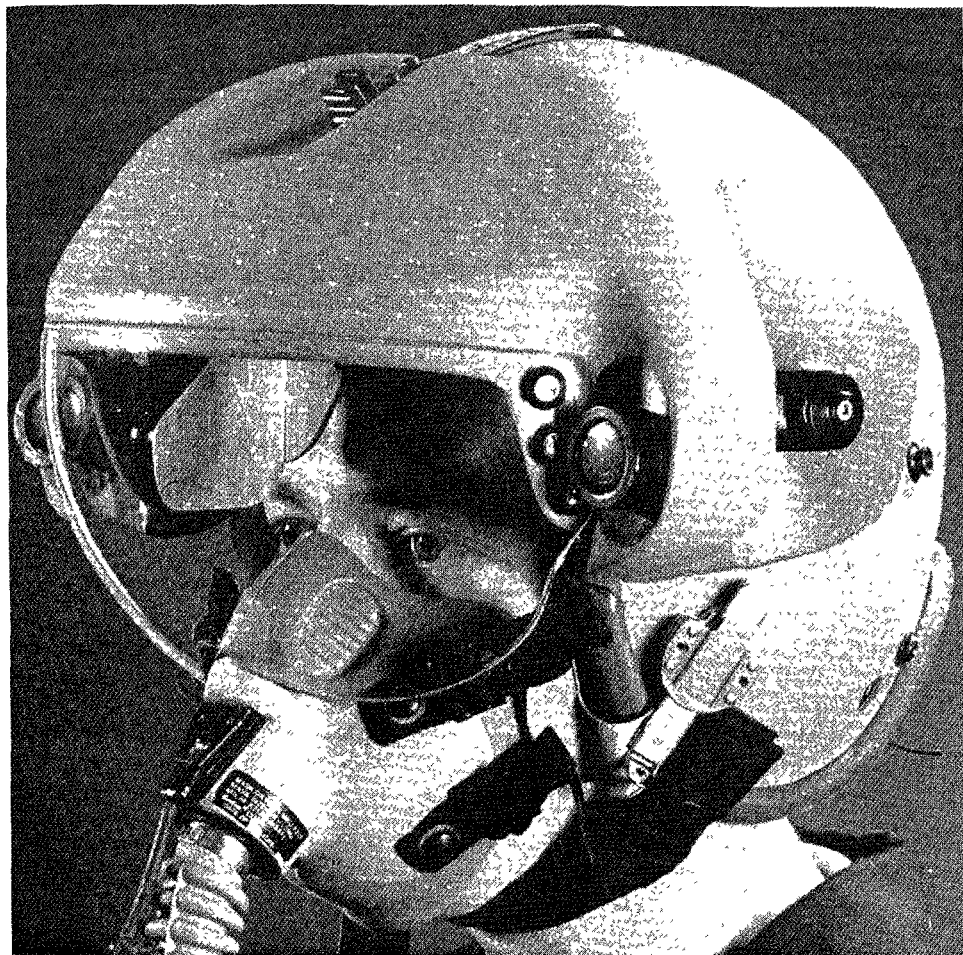
jagerpiloten, worden er zeer strenge veiligheidseisen gesteld. Zo mogen toestellen in de cockpit of op het lichaam van de piloot geen supplementair veiligheidsrisico introduceren in noodsituaties; brillen mogen slechts in heel beperkte mate het gezichtsveld verminderen en wegens de duur en het profiel van de missies mag de hoofdbelasting en vooral de momenten, uitgeoefend op het hoofd van de piloot, slechts in geringe mate toenemen.

Wegens veiligheidsredenen werd er ook hier voor een doorkijk-oplossing gekozen, ook mogen er bij voorkeur geen afbuigelementen tussen het gezicht van de piloot en het vizier geplaatst worden. Het projectiesysteem van de versterkte beelden maakt gebruik van het vizier van de helm; bij verschillende vizier standen blijft het nachtbeeld zichtbaar en blijft de overlap tussen het directe en het versterkte beeld be-

In tegenstelling met andere duurdere en zwaardere oplossingen gebruikt de VIPER-3 geen intermediaire displays voor de projectie van het beeld, maar wordt het uitgangsbeld van de beeldversterkerbuis rechtstreeks via het vizier naar de ogen van de piloot geprojecteerd. Wegens de volumebeperkingen en de plaatsing van de objectieven was het noodzakelijk om een langgerekte relay-optiek te bouwen, die de vorm van de helicopterhelm perfect volgde. Bovendien was het nodig om sommige

lenzen na de centrage verder te bewerken om hun vorm aan te passen aan het toegelaten werkvolume. De vorm van het vizier heeft de Delft Sensor Systems ontwerpers ook verplicht om een aantal lenzen te de-centreren.

Een foto van de Viper-3 module op een pilotenhelm is gegeven in Figuur 6. Hierop kan men dadelijk zien dat de VIPER-3 als voorzet module aan de helm bevestigd is



Figuur 6  
Foto van de VIPER-3 voorzetmodule op een pilotenhelm

## 5. Monolithische infrarood cameras

De hierboven beschreven kijkers verliezen hun functie bij volledige duisternis of onder slechte atmosferische condities: zij zijn gebaseerd op restlicht en werken in een vergelijkbare golflengteband als het menselijk oog. Daarom is er gezocht naar alternatieven, waarbij een ander golflengtebereik kan gebruikt worden: in het [3-5  $\mu\text{m}$ ] en [8-12  $\mu\text{m}$ ] gebied kan de warmtestraling uitgezonden door voorwerpen gedetecteerd worden. Het contrast in een temperatuurverschil tussen voorwerpen ofwel een verschil in emissie-constante (Zie ook kaderverhaal 2). In de meeste gevallen is IR straling minder gevoelig aan absorptie door mist- of stof-deeltjes.

Voor het detecteren van licht met een langere golflengte of m.a.w. van lichtdeeltjes met een kleinere energie zijn speciale materialen vereist; de meest gekende zijn HgCdTe of MCT, InSb, PbSnSe en PbSnTe. Wegens de lage foton-energie en bijgevolg ook wegens de kleine verboden energiezone in de bovenvermelde materialen, kunnen zij enkel met een voldoende lage ruis gebruikt worden, als ze gekoeld zijn tot zeer lage temperaturen. Ook is de materiaal-technologie en de fabricage-technologie niet zo ver ontwikkeld als voor Silicium; daarom werden tot voor enkele jaren slechts discrete detectoren of korte lineaire arrays vervaardigd. Op dit moment slaagt men erin om in serie arrays met maximaal 256\*256 detectoren te vervaardigen. Bovendien blijft het zeer de vraag of het voor de [8-12  $\mu\text{m}$ ] band zinvol is om grotere arrays te maken zolang de integratietijd door de lage detector-impedantie en de beperkte ladingsopslag beperkt blijft tot enkele 10-tallen microseconden.

Gedurende de laatste paar jaar zijn silicide detectoren, gebaseerd op een PtSi en IrSi overgang op Si, Si-Ge heterojuncties op Si en superrooster (Multiple Quantum Well - MQW) op basis van GaAs-AlGaAs de bestaande IR gevoelige materialen en structuren komen aanvullen. Door gebruik te

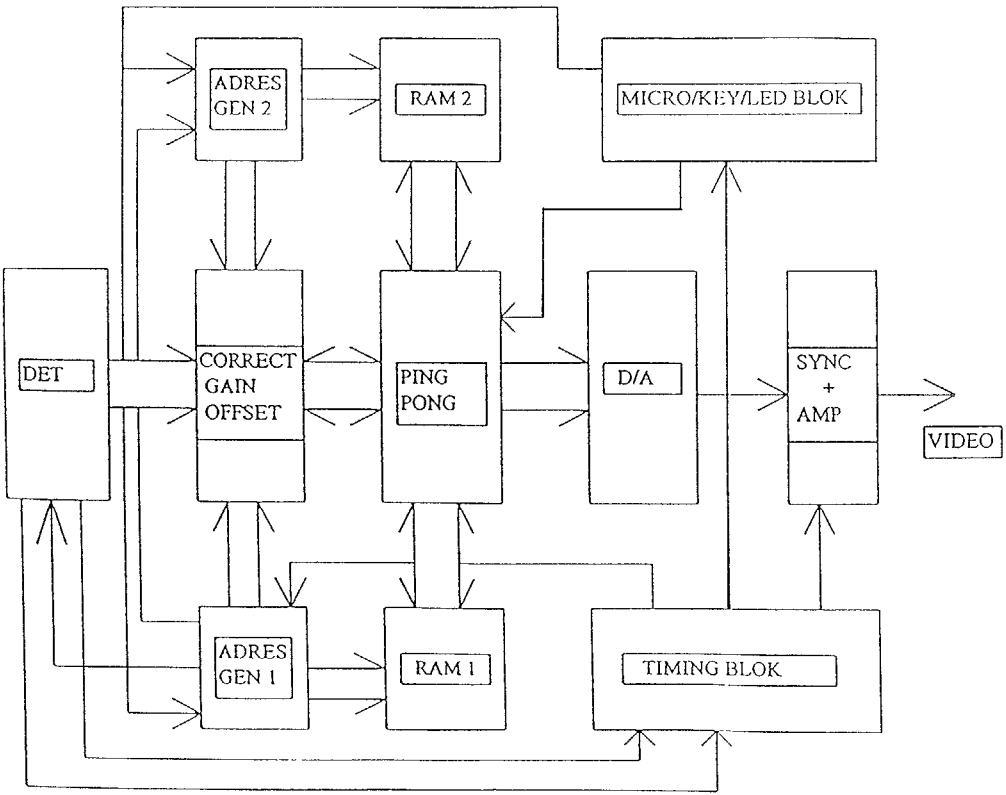
maken van meer mature materialen en technologieën kunnen met deze types detectoren veel grotere arrays met een goede tot uitstekende uniformiteit en reproduceerbaarheid gemaakt worden, in vele gevallen compenseert dit gegeven ruimschoots de lagere responsiviteit van de detectoren.

Delft Sensor Systems heeft IR gevoelige systemen ontwikkeld op basis van een 60 elements MCT detector array en op basis van 8 element SPRITE detectoren. De daarop gebaseerde camera systemen worden nog steeds beschouwd als de beste van hun generatie.

Op dit moment heeft Delft Sensor Systems een IR camera in ontwikkeling gebaseerd op een 640\*480 pixel PtSi detector chip. In het [3-5  $\mu\text{m}$ ] gebied is er een duidelijke systeemwinst om zoveel mogelijk pixels te integreren: de uitleeselectronica is voldoende snel en wordt niet verzadigd met een integratie-tijd van 40 msec of meer. De grootste uitdaging bij een dergelijk cameraontwerp bestaat in een reductie van de driftfenomenen en de ruis-effecten, die optreden in de opname en de signaalverwerking, alsook met de correctie van de niet-uniformiteiten tussen de verschillende detectoren. Een IR beeld wordt gekenmerkt door een laag contrast en een groot constant achtergrondsignaal. Maximale signaalamplitudes van 0.1 tot 1 % van het DC signaal zijn niet uitzonderlijk, dit houdt in dat het vereiste dynamisch bereik van de camera en de daarop volgende signaalverwerkingselectronica minstens een nauwkeurigheid van  $10^5$  tot  $10^6$  moet aankunnen.

In het voorliggende camera-ontwerp (Figuur 7) wordt zowel het eigenlijke integratie- of lichtsignaal opgemeten alsook het referentieniveau van ieder beeldpunt. Beide signalen worden van elkaar afgetrokken om de drift- en ruiseffecten van ieder beeldpunt te reduceren; hierdoor verkrijgt men een signaal dan enkel nog gelimiteerd





Figuur 7  
 Blokdiagram van de [3 - 5  $\mu$ m] PtSi camera

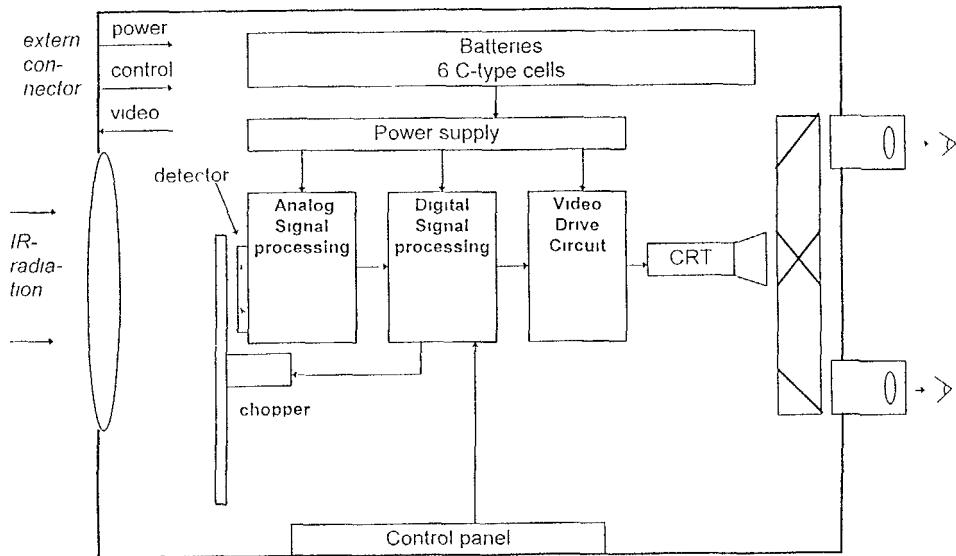
is door thermische ruis en foton-hagelruis. Vervolgens wordt op ieder beeldpunt een twee-puntscorrectie toegepast om de donkerstroom en de gevoeligheid van elk beeldpunt te corrigeren; om deze operatie met succes te kunnen uitvoeren moeten de voorafgaande onderdelen zeer lineair zijn in het werkingsgebied, iedere niet-lineariteit wordt immers versterkt en weergegeven als een foutsignaal dat proportioneel is met de grootte van het signaal. Een deel van de operaties gebeuren analoog, een ander deel wordt digitaal uitgevoerd; om de hierboven beschreven correcties voldoende nauwkeurig te kunnen doorvoeren moet er voor de A/D conversie nog een verschuiving van het DC niveau plaats vinden

en wordt de dynamiek van het signaal aangepast aan het bereik van de A/D converter.

Door het toepassen van de bovenbeschreven maatregelen verkrijgt men een IR camera, die vertrekkende van een PtSi chip met relatief lage gevoeligheid (piek quantum efficiëntie van 0.1 % in de 3-5  $\mu$ m band) en met een goede uniformiteit, leidt tot een NETD van 0.14 K met een F/1.3 optiek op basis van een triplet configuratie met gesplitste laatste lens. De MRTD van het systeem wordt enkel gelimiteerd door de geometrische effecten in de sensor

**6. Lion.**

In tegenstelling met de cameras beschre-



Figuur 8  
 Blokdigram van de [8 - 12  $\mu\text{m}$ ] ongekoelde LION camera

ven in de voorgaande paragraaf is de LION camera gebaseerd op een ongekoelde detector chip. Deze chip bestaat uit de hybride koppeling tussen een pyro-electrische detectormatrix en een uitleeselectronica. De detector zelf wordt gevormd door een vlakke platen condensator tussen een gemeenschappelijke bovinelectrode en een individuele onderelectrode. De verplaatsingsstroom, opgewekt in het pyro-electrische dielectricum als gevolg van een temperatuursverschil geïnduceerd door de invallende straling, wordt door de ladingsgevoelige versterker in de uitleeschip omgezet in een spanning. De detector chip is alleen gevoelig voor temperatuurveranderingen. Daarom wordt er in iedere camera op basis van pyro-electrische detectoren een chopper gebruikt, die een DC signaal omzet in een AC signaal (Figuur 8).

Ondanks de snelle evolutie op het gebied van pyro-electrische detectoren is op dit moment het aantal beeldpunten in de detector nog steeds de beperkende factor

voor de resolutie van het systeem. Daarom is in de LION een micro-scanner ingebouwd, die de beeldinformatie langs de beeld diagonaal over een halve beeldpuntsafstand verplaatst. Er is gekozen voor een optische micro-scanner, die samengebouwd is met de chopper. Iedere open fase van de chopper is voorzien van een vlak venster, geplaatst onder een goed berekende hoek t.o.v. de invallende straling waardoor de beeldinformatie over de halve beeldpuntsafstand verplaatst wordt.

Het objectief van de LION bestaat uit een nieuw type IR objectief bestaande uit 3 Germanium lenzen. Om een voldoende 'kleurcorrectie' te verkrijgen over de gehele [8 - 12  $\mu\text{m}$ ] band, is de middelste lens voorzien van een diffractie-rooster dat is aangebracht met behulp van diamond turning.

Buiten de hierboven beschreven elementen bevat de LION nog een speciale ASIC (Application Specific Integrated Circuit) om de interne huishouding van het

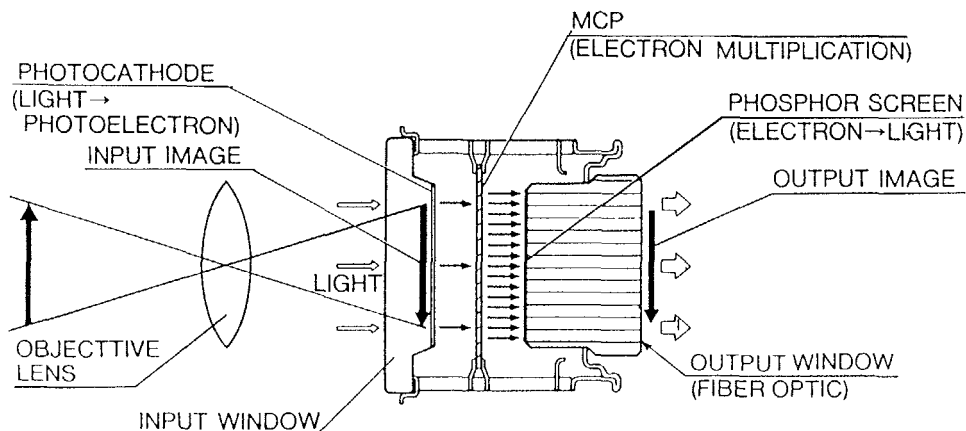
systeem te beheren en ook een weergave-eenheid op basis van een robuuste hoge-definitie miniatuur CRT. De LION wordt gevoed door 6 middenformaat batterijen, waardoor een werktijd van 8 uur verkregen wordt. Door gebruik te maken van speciale composietmaterialen weegt de complete LION kijker slechts net geen 2 kg, waardoor hij best vergelijkbaar is met het gewicht van een stevige verrekijker.

In termen van gevoeligheid van de detectoren is een ongekoelde IR camera veel minder performant dan een gekoelde camera. Op verschillende punten biedt deze camera echter grote voordelen:

- wegens de afwezigheid van een koeler, is het gewicht van de camera zeker 2 tot 2,5 kg minder,
- het vermogen-verbruik is aanzienlijk minder omdat er geen stroomverslindende koeler aanwezig is,

- Ondanks de gereduceerde gevoeligheid is de signaal-ruis verhouding van ongekoelde detectoren in de [8-12  $\mu\text{m}$ ] band niet veel slechter dan voor hun gekoelde tegenhangers, omdat deze laatste door hun lage detector impedantie een veel grotere bandbreedte hebben dan hun ongekoelde tegenhangers.
- Gekoelde [3-5  $\mu\text{m}$ ] detectoren hebben een veel betere signaal-ruis verhouding dan ongekoelde detectoren, maar de aanwezige straling in die band afkomstig van voorwerpen op kamertemperatuur is veel kleiner dan in de [8-12  $\mu\text{m}$ ] band, waardoor hun nauwkeurigheid daalt.

Het gevolg is dat voor toepassingen, waar gewicht de dominante factor is, ongekoelde cameras duidelijk de voorkeur genieten op gekoelde cameras. De LION laat toe om voorwerpen met een schijnbaar temperatuurverschil van 2°C te detecteren op minstens 2 km afstand.



Kader 1  
Doorsnede van een tweede generatie beeldversterkerbuis

## Kaderverhaal 1

### Basisprincipes van lichtversterking.

Overdag worden lichtniveaus gemeten tussen meer dan 10 000 lux in felle zonneschijn in woestijnachtige gebieden tot enkele lux gedurende de schemering. Dat is ongeveer het gebied waarin de mens optimaal kan waarnemen. Gedurende de nacht worden lagere lichtniveaus gemeten variërend tussen 1 lux en enkele tientallen  $\mu$ lux. Drij de lagere nachtelijke lichtniveaus komt men terecht in het gebied van de fotonentelling: een object reflecteert niet langer een continue lichtstroom, maar de detector wordt getroffen door discrete lichtpakketjes.

Een lichtversterkingsbuis gaat die minimale hoeveelheden licht opvangen en versterken tot een niveau dat bruikbaar is voor een waarnemer. Dit is een hoogvacuum component, waarin electronen worden versneld en versterkt. De fotonen of lichtquanta, die invallen op de fotocathode worden in deze laag omgezet in electronen. In tweede generatie buizen bestaat deze laag uit een geoptimaliseerde S25 multi-alkalilaag, met een breed gevoeligheidsspectrum. De film heeft een quantum efficiëntie van 25 % of m.a.w. 1 op 4 fotonen genereert een electron. Dit primaire electron wordt onder invloed van een electrisch veld versneld in de richting van een 'microchannel plate' - MCP. De gemiddelde doormeter van die MCP kanaaltjes is ongeveer 12  $\mu$ m en hun orientatie is lichtjes verschillend van de electrisch

veld vector. Daardoor komen de primaire electronen als vanzelf in botsing met de geleidende wanden van de MCP en rukken hier secundaire electronen los. Dit proces kan eventueel een aantal keren herhaald worden totdat er een wolk van ongeveer één miljoen electronen ontstaat. Belangrijk voor de goede werking van de MCP is dat er zo weinig mogelijk 'spontane' excitaties zijn: electronen die van de wand loskomen en het multiplicatie-proces in gang zetten. Een ander kwaliteitskenmerk is dat de statistische variatie op het aantal secundaire electronen zo klein mogelijk is, of m.a.w. dat de versterking zo constant mogelijk is.

Aan het uiteinde van de MCP worden de secundaire electronen nogmaals versneld naar een fosfor scherm: hier worden de electronen terug omgezet in lichtdeeltjes. Deze fosfor heeft een lange nalichttijd, daardoor wordt de ruis van het invallende lichtsignaal en van de MCP gedeeltelijk onderdrukt en bekomt men een veel rustiger beeld.

Een tweede generatie buis is uiterst compact gebouwd en alle onderdelen van de versterkerbuis liggen heel dicht tegen elkaar aan, vandaar dat men in dit verband ook spreekt van een 'proximity focus', dit in tegenstelling met eerste generatiebuizen waar een electrische lens gebruikt werd.

## Kaderverkaal 2 Infrarood beeldopnemers

In het begin van deze eeuw ontdekte Max Planck dat ieder voorwerp straling uitstuurt; de spectrale verdeling van de uitgezonden straling voor een ideaal lichaam – een 'zwarte straler' – voldoet aan de wet van Planck. Hoe hoger de temperatuur, hoe groter de uitgezonden stralingsdichtheid en hoe korter de piekgolflengte van het uitgezonden licht. Bij zeer koude voorwerpen, zoals de interstellare massa ligt deze emissiepiek rond 200 tot 500  $\mu\text{m}$  golflengte; voorwerpen op kamertemperatuur hebben een maximum rond 10  $\mu\text{m}$  en voorwerpen met een temperatuur boven de 800 à 900 °C beginnen zichtbare straling te vertonen.

De meeste voorwerpen zijn geen zwarte stralers en daarom heeft men het begrip emissie-constante in gevoerd; een voorwerp met een constante emissie-factor  $\epsilon$  over een groot golflengtebereik wordt een grijze straler genoemd, bij niet-constante  $\epsilon$  praat men over niet-ideale lichamen.

Als men dus de door een voorwerp uitgezonden straling kent, kan men dus ook de temperatuur van het voorwerp berekenen als men  $\epsilon$  kent of vice versa. De meeste materialen hebben een  $\epsilon$  die ligt tussen 0.75 en 0.95 met de uitzondering van gepolijste metalen, die een heel lage emissiefactor hebben, voor de meeste materialen geldt er immers:

$$\epsilon = 1 - \rho$$

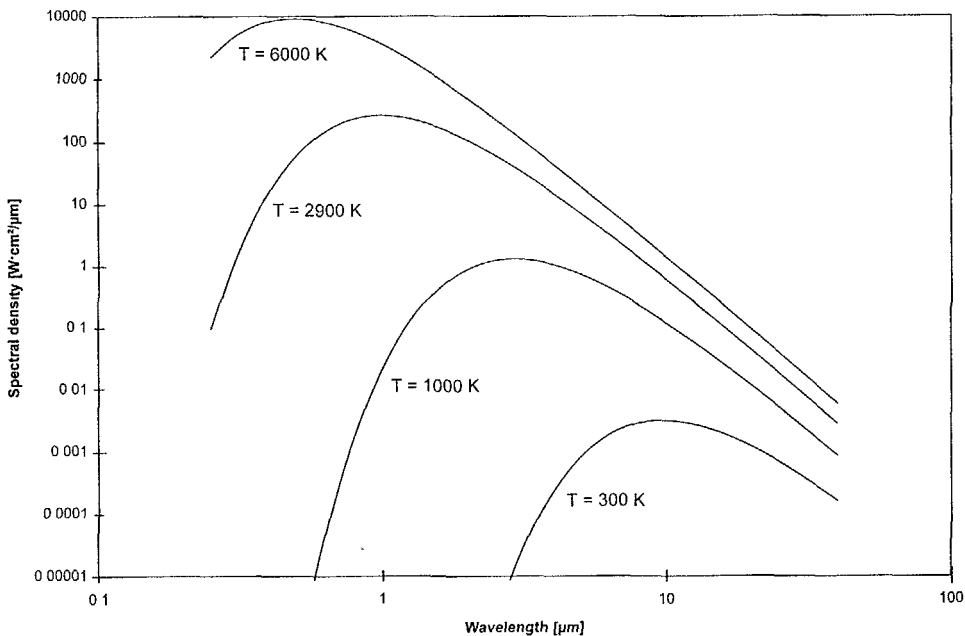
In het IR kan men dus voorwerpen onderscheiden, omdat ze door de thermische inertie een verschillende temperatuur hebben, ofwel omdat  $\epsilon$  verschillend is. Een voor het oog zwarte asfaltbaan en een grasveld op perfect dezelfde temperatuur zijn dus heel moeilijk te onderscheiden.

Niet alle golflengtes worden door de atmosfeer even goed doorgelaten, voor het uitvoeren van IR waarnemingen van voorwerpen op kamertemperatuur kan men gebruik maken van een tweetal vensters: een doorlaatband tussen 3 en 5  $\mu\text{m}$  (het 1ste thermische venster) en één vanaf 8  $\mu\text{m}$  (het 2de thermische venster).

IR straling kan voor praktische toepassingen op twee manieren gedetecteerd worden:

- met directe stralingsdetectoren of
- met indirecte stralingsdetectoren.

In directe detectoren wordt een lichtdeeltje in het materiaal omgezet in een electron-gat paar en wordt een verandering in IR lichtniveau onmiddellijk gemeten als een verandering in weerstand (foto-weerstand) of als een verandering in stroom (foto-diode). Hoe langer de golflengte en bijgevolg hoe kleiner de foton-energie, hoe exotischer de gebruikte materialen worden: het nabije IR tot 1.1  $\mu\text{m}$  kan nog met Si diodes gemeten worden, voor straling tot 1.4 of 1.8  $\mu\text{m}$  kan men InGaAs gebruiken. Voor het 1ste thermische venster gebruikt



## Kader 2

Stralingsdichtheid van een ideaal zwart lichaam voor verschillende oppervlaktetemperaturen

men HgCdTe, InSb, PbS, PbSe of PtSi; voor het tweede thermische venster kan men HgCdTe, PbSnSn, PbSnTe, IrSi en Si-Ge gebruiken. Voor nog langere golflengten valt men terug op de detectie via uitgevrozen onzuiverheidsniveaus in Si - Si:B en Si:P, en in Ge - Ge:Be, Ge:Ga en Ge Ga<sub>s</sub> of in GaAs. Bij indirecte detectoren wordt de IR straling eerst omgezet in een andere grootheid, meestal een temperatuurverschil, waarna de verandering van een (electrisch meetbare) materiaaleigenschap onder invloed van de temperatuurverschillen gemeten wordt. De meest ge-

bruikte temperatuursafhankelijke materiaaleigenschappen zijn:

- weerstand bolometers,
- dielectrische constante: pyro-detectoren
- e.m.k.: thermopiles
- druk: Golay-cel

Al deze detectoren zijn trager en minder gevoelig dan de directe detectoren, omdat de geïnduceerde temperatuurverschillen meestal zeer klein zijn. Het grote voordeel is wel dat dergelijke detectoren niet moeten gekoeld worden naar werkingstemperaturen in de orde van 150 of zelfs 77 K.