

Monolithisch teleoptisch systeem (2)

Optiek uit één stuk

Harrie Rutten, Bart Postema, Rik ter Horst In het eerste deel [10] werd aandacht besteed aan de opbouw van teleoptische systemen. Er werd een vergelijking gemaakt met een monolithisch objectief. In dit artikel zal worden ingegaan op het ontwikkelings- en vervaardigingstraject van een uniek stukje optiek.

De in het eerste deel behandelde aspecten die een compacte bouw van teleobjectieven in de weg staan, hebben de firma Opticon ertoe bewogen de ontwikkeling te starten van een monolithisch teleoptisch systeem. Monolithisch is afgeleid van 'mono' en 'lythos' oftewel één stuk. Monolithisch wil dus zeggen dat het hele optische systeem bestaat uit één stuk materiaal en niet, zoals in deel 1 werd beschreven, uit verscheidene losse of gekitte elementen. Met gewone sferische (=exact bolvormige) lensvlakken is dit niet mogelijk. Het zou een gewone enkelvoudige lens worden. Er zijn dan te weinig vrijheidsgraden om de afbeeldingsfouten te corrigeren. De afbeeldingsfouten die ontstaan zijn een monochromatische onscherpte in het midden van het gezichtsveld (de grootte van de afbeelding). Deze onscherpte zet zich voort over het hele gezichtsveld. Dan is er nog een monochromatische onscherpte die buiten de as optreedt en met toenemende afstand vanaf het midden van het gezichtsveld steeds groter wordt. Daar bovenop komen nog chromatische scherptefouten. Deze zijn bij een enkelvoudige lens onder zeer speciale voorwaarden te corrigeren: een sterk negatieve meniscuslens. Echter, een negatieve lens vormt geen beeld dat kan worden vastgelegd.

Als afgeweken wordt van de zuiver bolvormige vorm maar gekozen wordt voor een asferische vorm, is het mogelijk een monolithisch optisch element te

ontwerpen. Voorwaarde voor een goede werking is dat dit dan bij één golflengte benut wordt. De meest bekende toepassing van zo'n element is het objectiefje dat zit in de leeskop van een CD-speler.

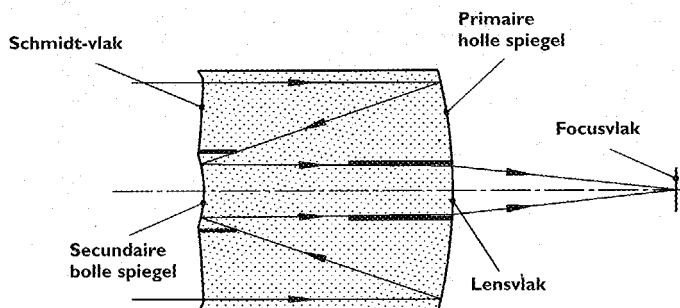
Bij systemen die een breed spectrum hebben, bijvoorbeeld het hele zichtbare licht, is dit dus onmogelijk. Bovendien is het gezichtsveld ook veel groter dan dat van een CD-leeskopje. Door echter gebruik te maken van een combinatie van asferische vlakken zijn er evenwel oplossingen mogelijk.

De firma Opticon heeft reeds goede ervaringen met long-distance microscopen volgens het Schmidt-Cassegrain-systeem [1], [2], [3]. Deze systemen bevatten sterke asferische lensvlakken. De toepassing van deze vlakken geeft ongekennde mogelijkheden omdat met een enkel lensvlak zeer grote correcties van afbeeldingsfouten mogelijk zijn. Opticon heeft niet alleen ervaring met het gebruik van deze asferische vlakken, zij heeft ook technieken ontwikkeld om deze op een prijstechnisch verantwoorde manier te fabriceren. Zelfs tot afmetingen van meer dan 250 mm lensdiameter! Reden voldoende de mogelijkheden van een monolithisch ontwerp te onderzoeken.

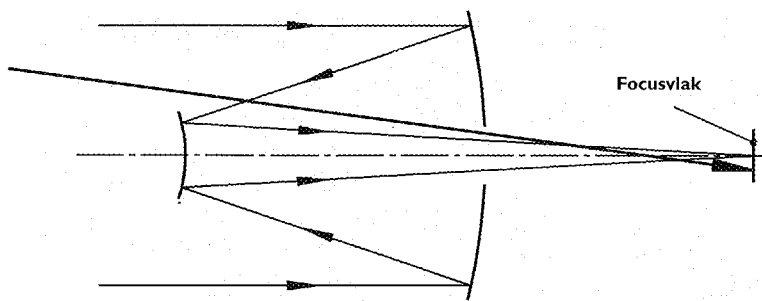
Wat is het monolithisch ontwerp?

Na een zeer uitvoerig onderzoek is Opticon erin geslaagd om de drie belangrijkste optisch werkzame vlakken van een Schmidt-Cassegrain systeem: Het Schmidt-vlak, de primaire sferische holle spiegel en het secundaire asferische bolle spiegel in één blok glas te genereren. Daarbij bleef nog de mogelijkheid open om een vierde optisch werkzaam vlak te gebruiken. Deze combinatie bleek uiteindelijk een resultaat te geven waarmee een hoge afbeeldingskwaliteit haalbaar is. De doorsnede van het optische systeem van de monoliet is weergegeven in figuur 1.

Figuur 1. Optische uitvoering van het monolithisch tele-objectief.

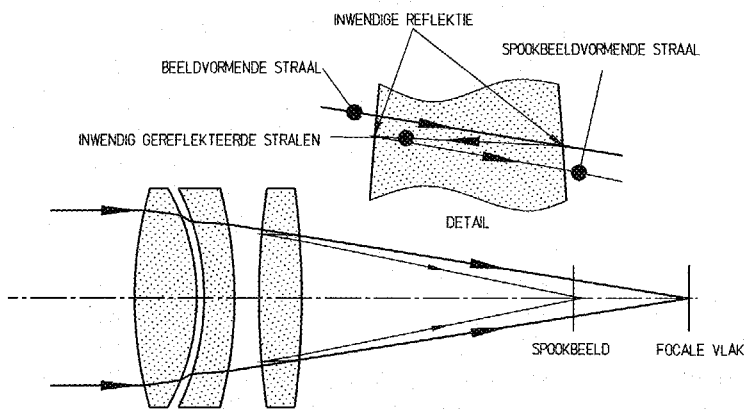


Monolithisch teleoptisch systeem (2)



Figuur 2.
Dagblindheid van een twee spiegel systeem.

In referentie [3] is duidelijk dat bij het gebruik van een twee-spiegelsysteem dagblindheid kan ontstaan. Dagblindheid wil zeggen dat licht dat niet deelneemt aan de beeldvorming, toch het vlak kan bereiken waar zich de afbeelding bevindt. Dit is weergegeven in figuur 2. Dit dient niet verward te



Figuur 3. Het ontstaan van inwendige reflecties en spookbeelden.

worden met spookbeelden die in conventionele optische systemen kunnen ontstaan ten gevolge van inwendige reflecties aan optische componenten zoals weergegeven in figuur 3. In niet-monolithisch systemen, dus de klassieke uitvoering, wordt de (lucht)ruimte die zich tussen de beide spiegels bevindt gebruikt voor het aanbrengen van dagblindbuizen ook wel baffles genaamd. In een monolithisch ontwerp is dat natuurlijk niet mogelijk. Ook zou het uiterst kostbaar worden om een samengesteld ontwerp te maken uitsluitend om deze essentiële hulpmiddelen in te bouwen. Dat zou het paard achter de wagen spannen zijn. De oplossing van dit probleem is even geniaal als eenvoudig. Het is mogelijk om in het glasblok ringvormige gaten te boren. Deze worden gevuld met een zwarte lak. Zo ontstaan in het monolithisch blok als het ware de dagblindbuizen.

Opbouw

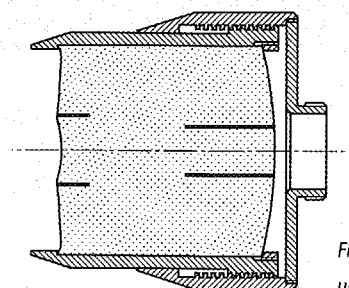
Door het monolithisch optische element wordt de mechanische opbouw van dit teleobjectief uiterst eenvoudig. Het bestaat slechts uit enkele elementen: het aansluitstuk voor op de videocamera dat tevens de aansluiting voor het huis is, het huis zelf, een schuifbuis waarin het optische element zit, een opsluitring en een focusseerring. Totaal dus slechts vier onderdelen. Dit vermeerderd met de optische component (enkelvoudig dus) op vijf!

Vervaardiging van samengestelde objectieven

Bij de fabricage van samengestelde objectieven worden de componenten in grote series vervaardigd. Dit geldt zowel voor de mechanische als de optische delen.

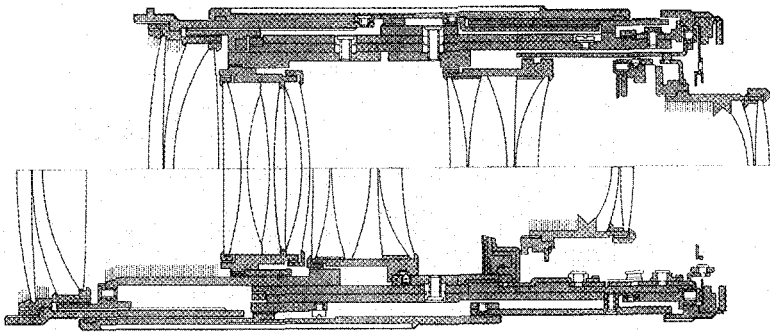
Vervolgens worden deze delen samengebouwd tot het uiteindelijke objectief en wordt in de eindcontrole bepaald of het systeem aan de gestelde eisen voldoet. Correctie is niet meer mogelijk, met uitzondering van de aanslag die geldt bij de focusseering op afstand oneindig.

Bij de fabricage van zeer hoogwaardige objectieven is de hierboven beschreven vervaardigingsmethode echter niet mogelijk. Als op dezelfde wijze geproduceerd zou worden dan zijn de toelaatbare toleranties van de afzonderlijke componenten zo klein dat deze onbetaalbaar zouden worden. Dankzij de sterk verbeterde meettechnieken en snel rekentool is een andere methode mogelijk. Daarbij wordt elke optische component exact doorgemeten op diameter, kromtestralen, middendikte en wigvorm. Ook worden alle mechanische onderdelen zoals afstandringen, vattingen, zittingen, etc. exact opgemeten. Uit een analyse bij het ontwerpen van het objectief is bepaald welke optische fouten de mechanische afwijkingen van lenzen en afstanden



Figuur 4. De mechanische uitvoering van het monolithisch teleobjectief.

Monolithisch teleoptisch systeem (2)



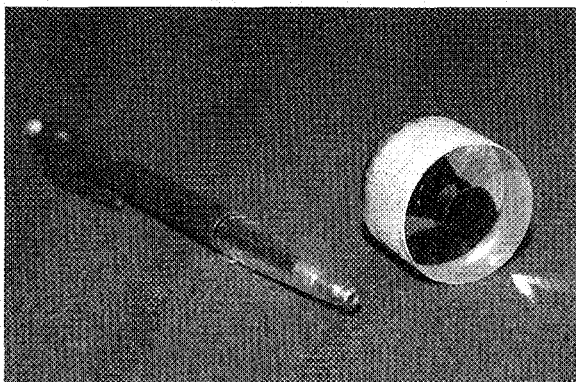
Figuur 5. De mechanische complexiteit van een samengesteld objectief. In dit geval een objectief met variabele brandpuntsafstand. (Uit: "Applied Photographic Optics"; Sidney F. Ray, Focal Press 1988)

onderling tot gevolg hebben. Op deze manier is het mogelijk dusdanige combinaties samen te stellen dat de eindkwaliteit van zo'n samengesteld objectief op een hoog niveau komt. Het nadeel van deze methode, naast de hoge kosten van het meten van de optische en mechanische componenten, is de routing. Er is een zeer goede logistieke coördinatie nodig om er zeker van te zijn dat niet de verkeerde combinaties in elkaar gezet worden. Dan wordt exact het tegenovergestelde van het gewenste resultaat bereikt. Hoe complex een samengesteld objectief er uit kan zien geeft figuur 5 aan, in dit geval een zoomobjectief waarin componenten onderling ook nog verschuifbaar moeten zijn.

Vervaardiging van een monoliet

In figuur 6 is de monoliet afgebeeld naast een balpen. Bij een monoliet is de methode zoals beschreven bij de vervaardiging van samengestelde objectie-

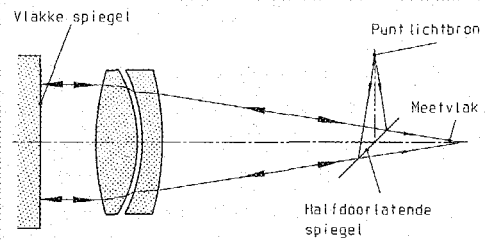
Figuur 6. De monoliet. Dit "ene blokje glas" is een compleet optisch systeem met vier optisch werkzame vlakken: twee sferen, één asfeer en één Schmidt-vlak. Hier afgebeeld naast een balpen.



ven niet toepasbaar om de eenvoudige reden dat het hele optische systeem slechts uit één component bestaat. Dat betekent niet dat er dan geen problemen zijn. Integendeel, het houdt in dat er speciale aandacht nodig is bij de fabricage van elk optisch werkzaam vlak en de mechanische geometrie van de monoliet. De realisatie van het monolithische teleob-

Auto-collimatie-opstelling

Bij een opstelling wordt de te testen optiek tegen een vlakke spiegel getest. Hierbij wordt in het brandpunt van de optiek een target gezet, meestal een puntbron. Via een half doorlatende spiegel wordt door het objectief een evenwijdige bundel gevormd. Deze wordt door de spiegel gereflecteerd en gaat weer terug door het objectief. Het passeert weer de half doorlatende spiegel. De

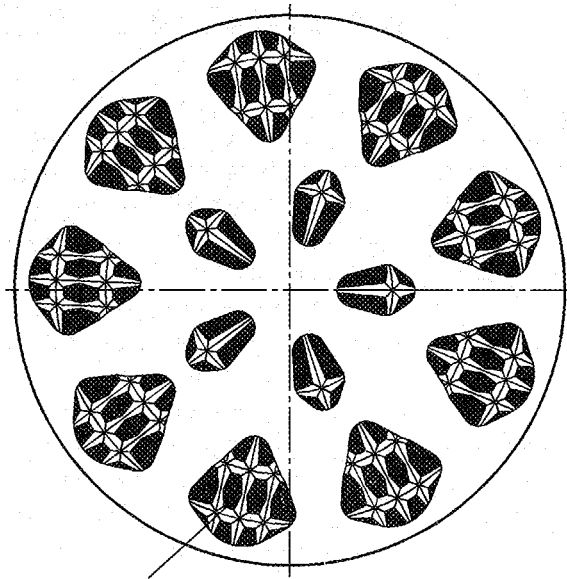


afbeelding die dan ontstaat wordt met een microscoop bekeken. Indien de afbeelding van het objectief perfect is, ontstaat ook een perfect evenwijdige bundel en ontstaat eveneens weer een perfecte afbeelding. Is dat niet het geval dan verdubbelt de fout. Omdat het objectief twee keer mee doet in de projectie wordt deze afwijking versterkt zichtbaar in het gezichtsveld van de microscoop. Op deze wijze zijn reeds zeer kleine fouten – afwijkingen in het golffront van 1/110 golflengte – in de afbeelding onmiddellijk zichtbaar. Met speciale gereedschappen zijn nog betere resultaten mogelijk.

jectief is een complex vervaardigingsproces. Immers, dat enige optische element bezit maar liefst vier optisch werkzame vlakken die twee aan twee aan één zijde van het glaslichaam zitten. Deze zijn: aan de voorzijde een (asferisch) Schmidt-vlak met in het midden een asferisch secundaire spiegeltje en aan de achterzijde de sferische primaire spiegel en in het midden een sferisch correctievlakje.

Kwaliteit van het glas

Het systeem is vervaardigd uit een optisch glas met een zeer hoge kwaliteit. Dit is nodig omdat het licht drie keer door hetzelfde stuk glas beweegt. Van hoge kwaliteit wil in dit geval zeggen dat het glas is met een hoge zuiverheid, homogeniteit en zonder belletjes. Glas met een lage homogeniteit uit zich door de aanwezigheid van slieren. In de slieren is de brekingsindex van het glas anders dan in de directe omgeving. Slechts



Figuur 7. Slijppads voor slijpen van de asferische Schmidt-vorm.

SLIJP/POLIJST PADS

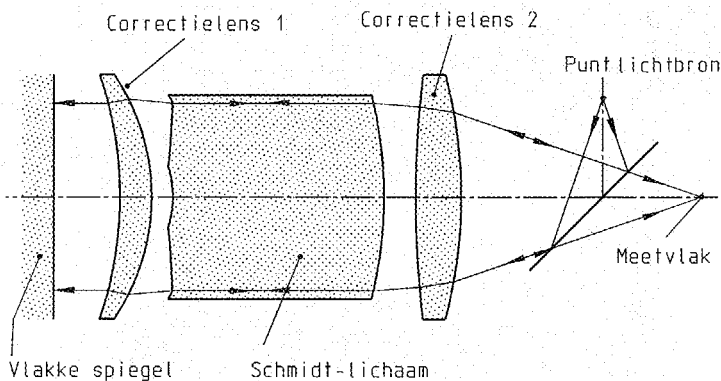
zeer kleine variaties in de brekingsindex zijn toelaatbaar. Bij een hoge kwaliteit glas is de variatie 0,000002 ($2 \cdot 10^{-6}$). Kleine afwijkingen in de absolute waarde van de brekingsindex kunnen echter met een extra optimalisatie van de vorm gecorrigeerd worden.

Ook is het aantal belletjes dat in het glas mag voorkomen gering omdat de afmetingen van met name de secundaire spiegel gering zijn. Bij een glas met een hoge zogenaamde belletjeskwaliteit is 0,05 mm de maximale waarde waarmee wordt gewerkt. Er wordt dan gewerkt met een maximum oppervlak van 0,03 tot 0,1 mm² per 100 cm³ glas.

Figuur 8. Het principe van de meetopstelling waarbij de kwaliteit van het Schmidt-vlak wordt gecontroleerd.

Fabricage van het optische element

De werkvolgorde is als volgt. Allereerst wordt een glazen cilinder vervaardigd. Hierin worden de optisch werkzame vlakken voorbereid. Dit zijn het bijna platte Schmidt-vlak en de gekromde primaire spiegel die wordt voorgefreesd. Voordat



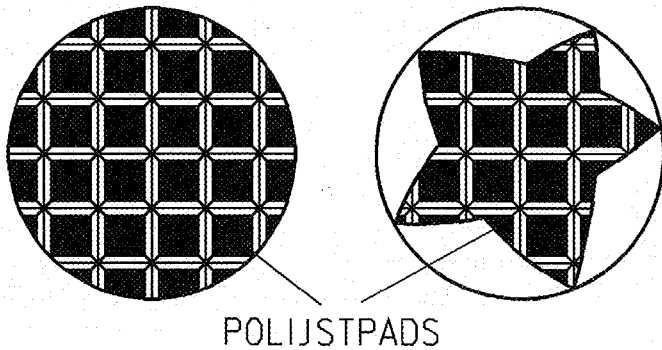
deze worden fijngeslepen en gepolijst, worden eerst de boringen aangebracht die dienen als dagblindbuizen. De reden om dit helemaal in het begin te doen, is het voorkomen dat eventuele restspanningen in het glas de vorm scheluw trekken, ofschoon dit bij een glas van hoge kwaliteit erg zelden voorkomt. Elk risico dient echter uitgesloten te worden.

Nadat de boringen zijn opgevuld met een vulmiddel, dat weer gemakkelijk te verwijderen is zonder sporen achter te laten, wordt één zijde perfect vlak fijngeslepen en gepolijst en van de achterzijde wordt de bolle vorm fijngeslepen en vervolgens gepolijst. De sferische vorm wordt binnen zeer enge toleranties gehouden qua kromtestraal en bolvorm. Deze laatste dient binnen $1/10$ golflengte van het licht te blijven. Ook wordt de wigvorm van de dikke lens binnen zeer enge toleranties aangehouden. Elke wigfout zou tot gevolg hebben dat het element een prismawerking krijgt. Dit heeft tot gevolg dat er een aantal monochromatische afbeeldingsfouten ontstaan, met name een asymmetrische kleurschifting. Vervolgens wordt aan de voorzijde in het vlakke deel door middel van speciale gereedschappen de asferische vorm eerst geslepen en later gepolijst. Deze vorm is zeer sterk asferisch. De afwijking van het vlak ten opzicht van een planvlak is vele tientallen micrometers. Om een strakke vorm te krijgen - die is essentieel voor een goede scherpte en vooral contrastoverdracht - zijn diverse gereedschappen nodig. De methode die wordt toegepast is met speciale slijppads zoals figuur 7 laat die zien. De vorm die hier opgevoerd is, is één van de vele stappen.

Als de vorm op basis van ervaring en metingen is geslepen, wordt het oppervlak gepolijst. Door zijn sterke asferische vorm kan dit niet met één pad maar worden ook weer verschillende speciaal gevormde polijstpaden gebruikt. Het heeft heel wat "trial and error" gekost voordat voldoende ervaring was opgebouwd om het vlak binnen de gestelde eisen te krijgen. De vorm dient ook weer binnen circa $1/10$ golflengte van de theoretische vorm te blijven.

De meetmethode die hiervoor gebruikt wordt is een optische meetmethode. In een speciale hulppoptiek wordt een kijkertje gevormd dat in een autocollimator (zie kader 1) opstelling past. Elke afwijking van de Schmidt-vorm wordt onmiddellijk

Monolithisch teleoptisch systeem (2)



Figuur 9. Polijstpads voor het polijsten van sferische vlakken (links) en asferische vlakken (rechts).

geconstateerd. De opstelling van het Schmidt-lichaam en de correctielensjes is weergegeven in figuur 8. Mochten er correcties nodig zijn dan kan dat heel gemakkelijk en snel gecontroleerd worden. Is uiteindelijk het Schmidt-vlak binnen de gestelde toleranties vervaardigd, dan worden de beide vlakken met een lak afgedekt om beschadiging tijdens het aanbrengen van het secundaire spiegelkje en het correctielensvlakje te voorkomen.

Nu wordt het secundaire spiegelkje voorgefreest, fijngeslepen en gepolijst. Vervolgens wordt het vlakje exact sferisch gepolijst. Dit gebeurt met een gewone, volvlakspolijstpad, zie figuur 9. Daarna wordt, ook weer met speciale polijstpads, de asfe-

rische vorm aangebracht. Deze is eveneens in figuur 9 te zien. Daarbij moet de lezer zich realiseren dat het hier gaat om een spiegelkje van 5 tot 12 mm diameter, afhankelijk van de grootte van het monolithisch objectief! Ook dit spiegelkje wordt in een speciale opstelling doorgemeten. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de zogenaamde Dall-Null-test (zie kader 2). Heel belangrijk bij het aanbrengen van deze spiegel is natuurlijk het samenvallen van de optische as van de Schmidt-vorm met die van het spiegelkje. Justeermogelijkheden zijn er niet. Tijdens het slijpen en polijsten is dat dan ook een voortdurend punt van aandacht en zorg. Nadat het spiegelkje binnen de gestelde toleranties is vervaardigd, in dit geval binnen $\frac{1}{4}$ golflengte van zijn theoretische vorm, wordt ook dit vlak weer afgedekt met een lak.

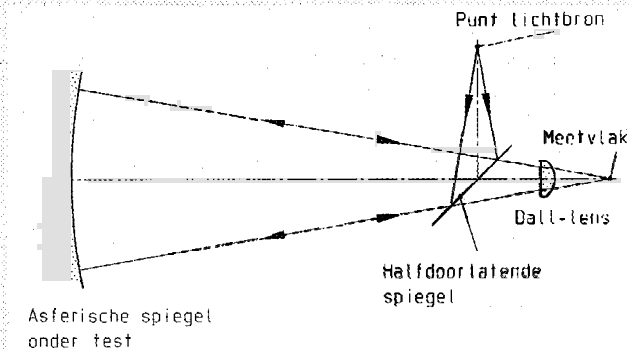
Nu is het vierde en laatste optische vlak van dit ene blok glas aan de beurt. Dit vlak wordt gebruikt om het beeldvlak vlakker te maken. Allereerst wordt de vorm gefreesd en vervolgens fijngeslepen en gepolijst. Ook hier geldt dat hieraan dezelfde aandacht besteed moet worden als bij het secundaire spiegelkje in het Schmidt-vlak. Ook dit lensvlakje mag geen wigfout vertonen met de overige vlakken.

Figuur 10. Het monolithisch teleobjectief geplaatst op een miniatuur CCD-camera.



De Dall-Null test

Bij de Dall-Null test wordt een puntbron in het kromtemiddelpunt van een holle asferische spiegel geplaatst. Het licht wordt naar de spiegel geprojecteerd door een halfdoorlatende spiegel. Indien de spiegel perfect sferisch zou zijn, zou het licht weer exact in één punt verenigd worden. Is de spiegel asferisch, dan is dat niet het geval. Door een speciale lens te ontwerpen, de Dall-Null lens, die in het con-



vergerende deel van de teruggekaatste bundel wordt geplaatst, kan het verenigen tot een punt weer bereikt worden. Elke afwijking van de asferische vorm vertoont dan een afwijking van de exacte stralenvereniging. "Null" slaat op de methode: net zolang te polijsten totdat de goede vorm bereikt wordt. Is dat het geval, dan is de afwijking in het door de spiegel geprojecteerde 'brandpunt' nul.

Als dit vlak gereed is worden de laklagen verwijderd en het opvulmiddel uit de dagblindbuisboringen verwijderd. Vervolgens worden de bolle achterzijde en het secundaire spiegeltje voorzien van een spiegellaag. In principe is het optische systeem nu klaar. De hele optiek wordt nu wederom in autocollimatie gezet en gecontroleerd of de afbeeldingskwaliteit binnen de toleranties valt. Is dit het geval dan worden het Schmidt-vlak en het lensvlakje voorzien van een antireflex-coating. Is dit niet het geval dan is het mogelijk door middel van een lokale retouche aan het oppervlak van het secundaire spiegeltje alle restfouten weg te werken. Tot slot worden de dagblindbuisboringen voorzien van een zwarte lak en is het optisch systeem gereed. Dit wordt nu in de vatting gezet opdat het systeem ook gefocuseerd kan worden voor eindige afstanden afhankelijk van het fabrikaat van de videocamera waar deze op wordt aangesloten. Figuur 10 toont een objectief dat aangesloten is op een miniatuur CCD-camera. Ofschoon het op de foto lijkt alsof het een gigantisch objectief is valt aan de schroefjes aan de zijkant af te leiden dat de afmetingen zeer beperkt zijn.

Toepassing

De basistoepassing voor deze nieuwe optische systemen is het gebruik in de bewaking en beveiliging. De bedoeling was een klein compact teleobjectief te ontwikkelen dat niet opvalt, bijvoorbeeld bij bewakingstoepassingen, of een kleine massa-traagheid moet bezitten in dynamische toepassingen, bijvoorbeeld als inspectie-objectief. Bij conventionele systemen was de bouw lengte nog altijd groot. Voor objectieven met een brandpuntsafstand van bijvoorbeeld 400 mm was het nog altijd een bouw lengte van circa 250 mm. Door gebruik te maken van het Schmidt-Cassegrain systeem kon de bouw lengte gereduceerd worden tot circa 80 mm. Dit is nog steeds een behoorlijke maat. De ontwikkeling werd een andere richting gegeven door te kiezen voor een monolithisch ontwerp. Hierdoor kon de bouw lengte teruggebracht worden tot zelfs circa 40 mm! Dat is slechts $\frac{1}{10}$ van de brandpuntsafstand.

Tot besluit

Met een knap staaltje vakmanschap is de firma Opticon erin geslaagd een monolithisch ontwerp te maken van een complex optisch ontwerp. Het is daarmee uniek in de wereld. Het getuigt van beheersing van het vak om aan één blok glas vier optisch verschillende vlakken aan te brengen waarbij het risico voor prismawerking zelfs drie keer aanwezig is.

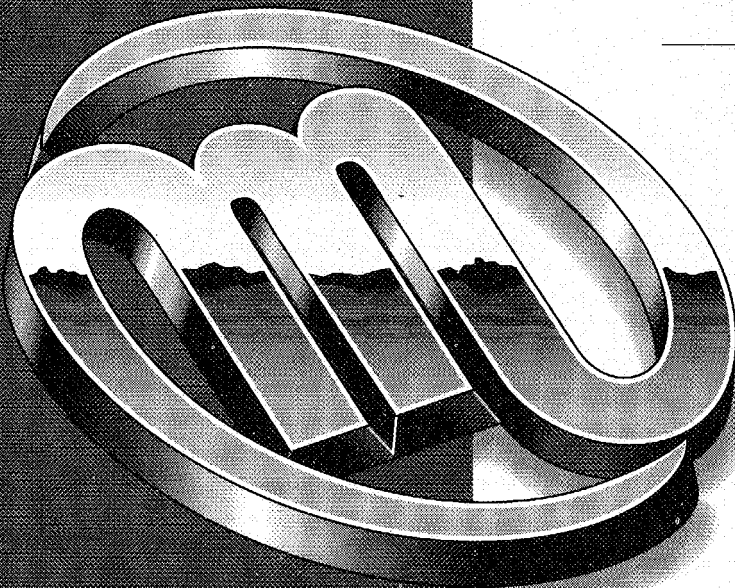
Het hier beschreven ontwerp was het prototype. Intussen is het ontwerp enigszins gewijzigd waardoor de optische kwaliteit nog kon worden verbeterd.

Auteursnoot

R. ter Horst en B. Postema zijn werkzaam bij Opticon te Groningen. R. ter Horst is de ontwerper van het optisch systeem en ontwikkelaar van de fabricagetechniek voor het Schmidt-vlak. B. Postema is verantwoordelijk voor de overige fabricage- en bewerkingstechnieken van het in dit artikel beschreven monolithisch teleobjectief. Het optisch systeem werd ontworpen met de software behorende bij het boek "Telescope Optics" Opticon vervaardigt, naast het in dit artikel beschreven staaltje van vakmanschap, ook hoge kwaliteits amateur-telescopen, semi-professionele telescopen, long-distance microscopen, speciale- en precisie-optiek, enkelstuks en kleine series.

Literatuur

- [1] H.G.J. Rutten; Ongekend hoge afbeeldingskwaliteit: De Schmidt-optiek. Mikroniek 34 (1994) 2.
- [2] H.G.J. Rutten; Optica op basis van een telescoop: Long-distance microscoop. Mikroniek 34 (1994) 3.
- [3] R. ter Horst, B. Postema, H. Rutten; Een long-distance microscoop van Nederlands fabrikaat. Mikroniek 34 (1994) 4.
- [4] H.G.J. Rutten, M.A.M. van Venrooij, Telescope Optics, Evaluation and Design.. Willmann Bell inc. 1988 p. 71.
- [6] R. Schorr, Das B. Schmidtsche Verfahren bei der Herstellung der Korrektionsplatte für Komafreie Spiegel. Zeitschrift für Instrumentkunde 56 (1936) p. 336.
- [7] Lens Design Fundamentals R. Kingslake; Academic Press 1987, p. 55.
- [8] Spiegeloptik; K. Wenske; Verlag Dr. Vehrenberg 1978, p 90, p. 131.
- [9] H.E. Dall; A null Test,, ATM book 3, Scientific American, p. 149.
- [10] H. Rutten, B. Postema, R. ter Horst, Monolythisch Optisch systeem (1), Mikroniek 37 (1997)5, p. 104



M e v i

FIJNMECHANISCHE
INDUSTRIE

CO-MAKERSHIP in:

- Precisie
- Prototypen
- Mechatronica
- Machinebouw

Voor meer info:
<http://www.mevi.com>

Postbus 238, 5700 AE Helmond, Weth. den Oudenstraat 1, 5706 ST Helmond
Telefoon +31 492 53 86 15, Fax +31 492 53 87 35, E-mail info@mevi.com