

Ongekend hoge afbeeldingskwaliteit

De Schmidt-optiek

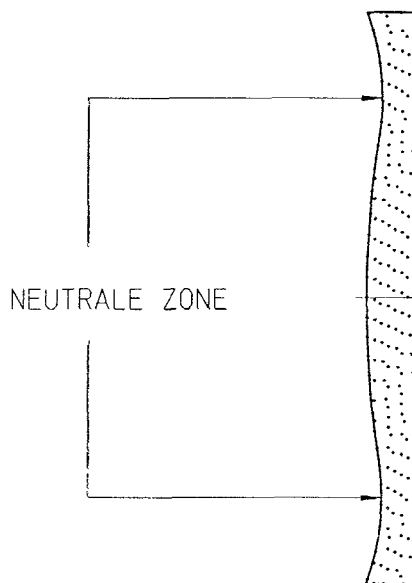
H.G.J. Rutten

De Schmidt-lens is genoemd naar zijn uitvinder Bernhard Schmidt. Het is de belangrijkste component van de Schmidt-optiek, die bestaat uit deze lens, die tevens dienst doet als diafragma, en een sferische spiegel. Deze combinatie staat in de optica bekend als de meest lichtsterke met een ongekend hoge afbeeldingskwaliteit. Daarmee is bij grote openingen een groot gezichtsveld te bereiken. Dit artikel behandelt de basisprincipes van de Schmidt-optiek, de vorm die aan deze bijzondere vorm ten grondslag ligt, de fabricagemethode en wat ermee bereikt kan worden in de astronomie en (long distance) microscopie. Dit artikel dient als voorbereidend artikel voor een volgend artikel over long distance microscopie.

De Schmidt-lens is asferisch, hetgeen wil zeggen dat de lensvorm niet zuiver bolvormig is. Het is ook geen kegelsnede, zoals de parabolode die vaak bij de Newton-telescoop gebruikt wordt. Het bijzondere van het Schmidt-lensoppervlak is, dat het zowel een bolle als een holle vorm heeft aan een en hetzelfde vlak. De plaats waar de diepte van het oppervlak het grootst is wordt neutrale zone genoemd. De doorsnede van dit merkwaardig oppervlak is weergegeven in figuur 1. De wulving in deze figuur is zeer sterk overdreven aangegeven. In werkelijkheid is de hoogte slechts enkele tientallen micrometers bij een lensdiameter van bijvoorbeeld 130 mm. Daarom lijkt zo'n oppervlak plat en wekt het de indruk een gewoon venster te zijn.

Bernhard Schmidt en zijn vinding

In 1879 werd Bernhard Voldemar Schmidt geboren als zoon van een visser op het Letlandse eiland Nagern. Aanvankelijk studeerde hij technische wetenschappen aan de technische universiteit van Göteborg. Deze studie brak hij af en ging opnieuw beginnen



Figuur 1 Doorsnede van een zogenaamde Schmidt-lens. De hoogte van het profiel is circa 500 x vergroot weergegeven

aan de technische hogeschool van Mittweida in de buurt van het huidige Chemnitz. Daar woonde hij tot 1928, waar hij intussen een optische werkplaats met een sterrenwacht had ingericht en zich had toegelegd op de fabricage van zeer hoogwaardige, met name, astronomische lenssystemen en spiegels. Rond 1930 - hij was inmiddels verhuisd naar Hamburg waar hij werkte voor de Sterrenwacht Bergedorf - vond hij een naar hem genoemd totaal nieuw type fotografische telescoop uit. In 1935 stierf Schmidt aan een longontsteking en nam de fabricagemethode van het merkwaardig gekromde oppervlak mee in zijn graf. De directeur van de Hamburgse sterrenwacht in die dagen, Richard Schorr, kende evenwel de methode en publiceerde een jaar na Schmidt's dood uitgebreid de door hem toegepaste techniek. Deze bleek in theorie opvallend eenvoudig, in de praktijk was het en is het nog steeds een technisch hoogstandje. Opmerkelijk is dat Schmidt vele technische hoogstandjes ten uitvoer bracht met slechts een arm. De

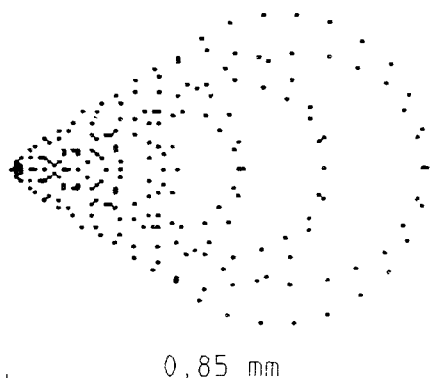
andere arm heeft hij sinds zijn jeugd moeten missen toen er iets mis ging bij het experimenteren met zelf gemaakte springstoffen.

Oorspronkelijk voor de astrofotografie

In het begin van deze eeuw kwam de astrofotografie op in de astronomische wetenschap. Deze werd (en wordt) nog steeds gebruikt om de hemel over een groot veld fotografisch vast te leggen en niet te tekenen zoals dat tot dan toe gebruikelijke was. Dit tekenen gebeurde aan de hand van nauwkeurige metingen van doorgangstijden van sterren door de (noord/zuid) meridiaan en de (grootste) hoogte boven de horizon.

Voor het fotograferen waren echter lichtsterke objectieven nodig. Indertijd werden primair Newton-telescopen gebruikt die niets meer en niets minder zijn dan een grote parabolische spiegel. De grootste die in deze periode operationeel was, had een spiegel diameter van 2,5 meter met een vormnauwkeurigheid van het spiegeloppervlak van maar liefst 0,05 micrometer(!), de brandpuntsafstand was 12,5 meter.

Dit betekent dat deze spiegel een lichtsterkte heeft van 5: de brandpuntsafstand is 5 keer zo groot als de diameter



Figuur 2 De weergave - in de vorm van een spotdiagram, zie tekst - van de afbeelding van een ster die duidelijk de afbeeldingsfout coma laat zien. Dit is in dit geval de onscherpte die ontstaat bij een parabolische spiegel met een diameter van 2,5 m, een brandpuntsafstand van 12,5 m en een beeldhoek van slechts 3' (boogminuten)

van het objectief. Hoe lichtsterker een objectief (des te kleiner is het getal), des te korter behoort er belicht te worden om dezelfde informatie (zwarting) op het, toen nog slechts weinig lichtgevoelige, fotografische materiaal te krijgen.

Maar niet alleen de lichtsterkte speelt een rol. Van grote betekenis is ook de afbeeldingskwaliteit. Hoe hoger de afbeeldingskwaliteit van een optisch systeem, des te kleiner is het vlekje waarin al het licht van een ster dat door het objectief gaat wordt verenigd. En hoe kleiner dit vlekje des te hoger de intensiteit en daardoor wordt des te eerder een zwarting van de emulsie verkregen.

De 2,5 meter grote spiegel verenigt het evenwijdig aan de optische as binnenvallende licht exact. Buiten deze optische as wordt het beeld al heel snel onscherp tengevolge van afbeeldingsfouten. Zo is het fotografische bruikbare veld van de eerdergenoemde 2,5 meter grote spiegel niet groter dan slechts circa 10 mm. Dat is minder dan de helft van een kleinbeeldnegatief! De onscherpte die optreedt wordt coma genoemd; dit is een asymmetrische aberratie.

In figuur 2 is zo'n vlek weergegeven voor een parabolische spiegel, die op de optische as een perfecte stralenvereniging heeft, voor een opening van 130 mm met een brandpuntsafstand

van 500 mm en op een afstand van 10 mm vanaf de optische as. De vlek is weergegeven in de vorm van een zogenaamd spot-diagram, zie kader.

Dergelijke spiegeloptieken waren dus niet geschikt voor het fotograferen van grote sterrenvelden. Om die reden werd begonnen met het ontwikkelen van speciale lichtsterke lensobjectieven. De lichtsterkste objectieven die indertijd voor de astrofotografie bestonden hadden een openingsverhouding van circa 5,6.

Speciaal voor een toepassing als het nauwkeurig uitmeten van sterposities en sterrenvelden mogen de objectieven

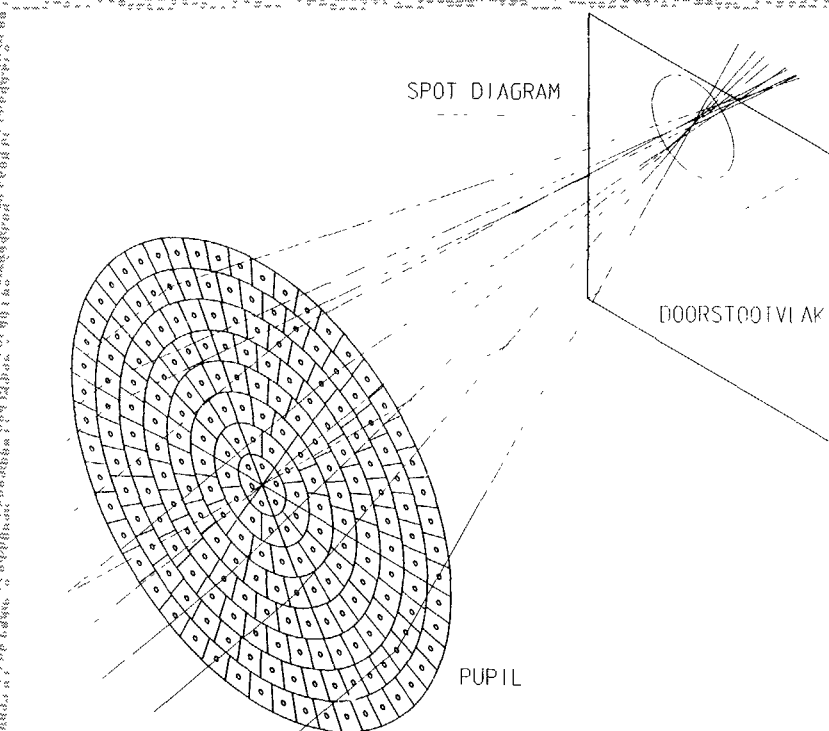
Spot-diagrammen

Dit zijn diagrammen waarbij met behulp van een computer de weg die het licht door de optische elementen aflegt exact wordt gesimuleerd, en wordt bepaald waar dit licht in het brandvlak terecht komt. Dit is de meest duidelijke manier van presentatie zodat ook voor niet-optici de beoordeling gemakkelijk is.

De werkwijze is daarbij dat de inree-opening opgedeeld wordt met behulp van een raster van bijvoorbeeld 250 vakjes, zoals is weergegeven in figuur 3. Het midden van elk vakje wordt door een straal vertegenwoordigd. Vervolgens wordt bepaald hoe de lichtstraal aan een vlak breekt als het een lensvlak betreft en hoe deze reflecteert als het een spiegel betreft. In het brandvlak, waar in de praktijk een gevoelige emulsie (film) of halfgeleider (CCD-chip) staat, wordt bepaald waar deze terecht komt. Deze plaats noemt men doorstootpunt en wordt in het spot-diagram weergegeven met een punt (spot). Naarmate de spreiding van de plaatsen van deze doorstootpunten een kleinere doorsnede heeft, is de intensiteit hoger en treedt des te eerder een reactie op. Deze is bij een emulsie de zwarting en bij een halfgeleider het ontstaan van vrije elektronen.

De verzameling van de doorstootpunten wordt ook wel verstrooiingsfiguur genoemd. Dit geldt vooral als voor de berekening van een spot-diagram heel veel (enkele duizenden) lichtstralen zijn gebruikt. De verdeling van de spots in de verstrooiingsfiguur geeft dan aan hoe de lichtsterkteverdeling is en op welke plek het eerste een reactie geeft bij het opname-materiaal. Bij een CCD-chip hebben de respons en de weergave een ander gedrag als bij een fotochemische laag. Het zou echter te ver voeren dit hier nu in detail te behandelen. Duidelijk is dat dit voor een groot deel veroorzaakt wordt doordat een CCD-chip een digitaal beeld geeft dat bijvoorbeeld uit 256×380 elementjes is opgebouwd. Over het algemeen blijkt het spot-diagram het meest betrouwbaar en gemakkelijker interpreteerbaar te zijn dan grafieken en getallentabellen.

Figuur 3. De origine van het spot-diagram; zie tekst. Voor de duidelijkheid zijn slechts enkele lichtstralen getekend. Het optisch systeem is om dezelfde reden niet getekend.



Ongekend hoge afbeeldingskwaliteit

slechts een zeer geringe vertekening geven. Want, hoewel dit geen scherptefout is, het is erg storend als de afstanden tussen sterren niet proportioneel zijn. Afgezien van dit schoonheidsaspect is het duidelijk dat het uitmeten van posities onmogelijk nauwkeurig kan gebeuren als de afbeeldingen van de sterren niet scherp en vooral niet symmetrisch zijn, doordat bijvoorbeeld de eerder genoemde beeldfout coma optreedt.

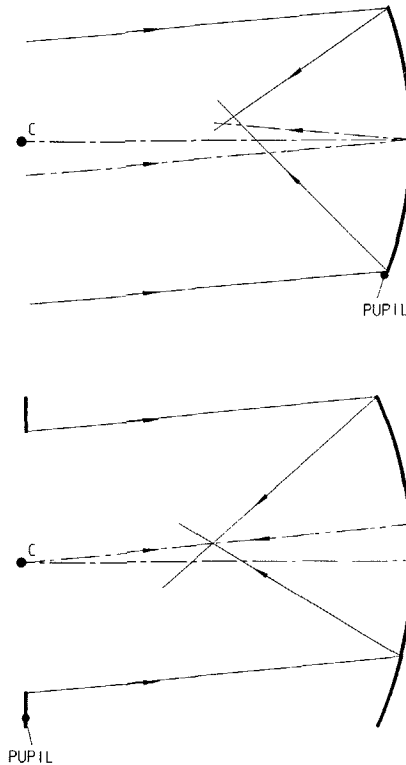
Een ander nadeel is dat het licht dat bijvoorbeeld in het 'staartje' van de coma-fout zit, zie figuur 2, lange tijd nodig heeft om een respons te geven op het ontvangstmedium. Dat is zonde, want in principe gaat dan een hoop licht 'verloren' en draagt niet bij tot het vastleggen van met name zwakke objecten.

Tot de jaren dertig van deze eeuw waren de onscherptevlekjes bij de beste astro-camera's nog altijd circa 0,1 tot zelfs 0,25 mm groot. Daarbij waren de vorm en de afmetingen van die vlekjes ook nog eens afhankelijk van de plaats ten opzichte van de optische as van het instrument. De vertekening kreeg men weliswaar goed in de hand, maar ondanks dat bleef de situatie onbevredigende, vooral door de beperkte lichtsterkte.

Tientallen optische ontwerpers zijn bezig geweest om de steeds maar weer lensoptieken te verbeteren zonder dat het aantal lenzen extreem zou worden. Immers, bij elke lucht/glas en glas/lucht overgang ging in die tijd 4% licht verloren. Men kende indertijd nog geen optische coatings die dit beperken. Heden ten dage zijn er zeer speciale coatings die het verlies beperken tot zelfs minder dan 0,1%. De Duitser Sonnenfeld slaagde er op een gegeven moment in een vierlenzer te maken met een zeer goede scherpte.

De grootte van deze lenssystemen werd beperkt door de afmetingen van de lenzen. Op de eerste plaats zijn grote lenzen zwaar en buigen door. Een andere reden is dat in die tijd het maken van grote, dikke, glasschijven met een grote zuiverheid nog niet goed mogelijk was.

Intussen werd ook gerekend aan speciale correctoren voor de grote spiegeltelescop. De functie hiervan is om het onscherpe beeld dat buiten de optische as ontstaat te verbeteren. Helaas waren

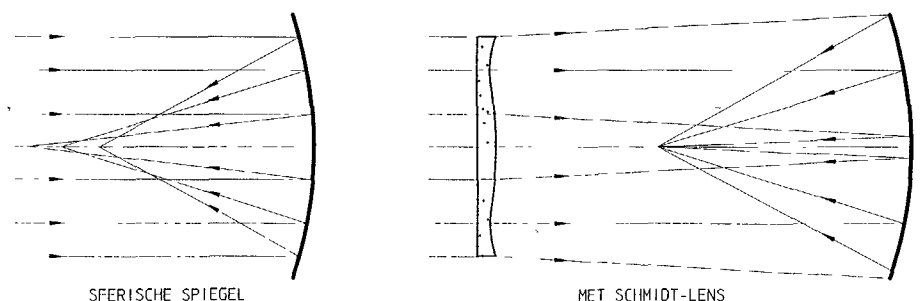


Figuur 4 Het voorkomen van asymmetrische afbeeldingen door een sferische spiegel, door het plaatsen van een diafragma in het kromtemiddelpunt C

de resultaten niet erg bevredigend.

Een van de weinige resultaten van alle inspanningen was dat zeer zwakke objecten fotografisch vastgelegd konden worden door gebruik te maken van grote spiegeltelescop. De lichtsterkte van deze telescopen lag doorgaans in de buurt van $F/3$ tot $F/5$.

Schmidt's vondst was dat hij een uiterst eenvoudig principe uit de optica toepaste om de asymmetrie op te heffen en een lens bedacht en maakte om de onscherpte, die ontstaat bij een sferische spiegel, teniet te doen.



Figuur 5 De werking van de Schmidt-lens in combinatie met een sferische spiegel. Links zeer sterke sferische aberratie die rechts door een Schmidt-lens is opgeheven

De werking van de Schmidt-optiek

Het basisprincipe van een Schmidt-optiek bestaat uit een sferische spiegel en een diafragma dat geplaatst is in het kromtemiddelpunt C van deze spiegel. Op deze manier heeft elke binnentredende bundel als het ware een eigen optische as. (De optische as is immers de hartlijn van de sferische spiegel.) Omdat het diafragma op die bijzondere plaats staat, gaat elk middelpunt van een bundel ook door het kromtemiddelpunt. Op deze manier kan asymmetrie dus niet optreden. Dit is duidelijk te zien in figuur 4, waarin twee situaties zijn weergegeven. De eerste situatie geeft de opstelling van een spiegel op zich. In dat geval ligt de bundelbegrenzing (pupil) bij de spiegel zelf. In het tweede geval is de pupil in de vorm van een diafragma geplaatst in het kromtemiddelpunt. In beide gevallen is een scheefvallende bundel getekend en is de reflectie van de drie belangrijkste stralen uitgewerkt. Deze belangrijkste stralen zijn de as-straal en de beide begrenzendende stralen. In het eerste geval is te zien dat deze laatste elkaar snijden buiten de as-straal. In het tweede geval valt het snijpunt wel op de as-straal. Uit het eerste geval kan worden geconstateerd dat een symmetrische verstrooiingsfiguur onmogelijk gevormd kan worden.

Een zuiver sferische spiegel, zoals door Schmidt toegepast, produceert echter geen scherpe afbeelding. De onscherpte die ontstaat, wordt, naar zijn oorsprong, sferische aberratie genoemd. Deze is bij spiegels met grote opening ten opzichte van hun brandpuntsafstand erg groot. Van stralen op verschillende afstanden vanaf de optische as is bij sferische aberratie de afstand van hun 'brandpunten' tot de spiegel

niet gelijk. Deze wordt korter naar mate de afstand vanaf de optische as toeneemt; zie figuur 5.

Door de spiegel parabolisch te maken in plaats van sferisch kan op de as een goede stralenvereniging worden bereikt. Buiten de as blijft de situatie zeer onbevredigend. Ook al zou er een diafragma geplaatst worden blijft zich buiten de optische as een asymmetrische verstrooiingsfiguur vormen. De oorzaak hiervan is dat bij de parabool alleen de optische as een symmetrie-as is. De reeds genoemde Schmidt-lens, die hierna beschreven wordt, is nu in staat deze afbeeldingsfout op te heffen. Een Schmidt-optiek is dus pas compleet door de combinatie van een sferische spiegel met een Schmidt-lens in het kromtemiddelpunt van deze spiegel.

De Schmidt-lens

Een normale lens, hol of bol, heeft in bijna alle gevallen een sferisch (zuiver bolvormig) oppervlak. Lenzen die geen zuiver bolvormige oppervlakken hebben noemt men asferische lenzen. Asferische lenzen worden uiterst zelden gebruikt in afbeeldende systemen. Wel in de illuminatie-optiek zoals condensoren in dia-, film- of overheadprojectoren. Dat zijn meestal paraboloïden of hyperboloïden. Deze lenzen zijn zeer sterk gekromde, met brandpuntsafstanden die vaak weinig meer zijn dan de diameter van de lens zelf.

De Schmidt-lens daarentegen is een buitenbeentje. De lens is aan een zijde hol en bol tegelijk: in het midden de brandpuntsafstand positief en aan de rand negatief is, zie figuur 1. Dat wil dus zeggen dat in het midden een positieve brandpuntsafstand heeft en aan de rand een negatieve. Deze lens zal dan dus in het centrum de eigenschappen van een positieve en in de randzone de eigenschappen van een negatieve lens bezitten. Daarom zal deze lens op zich geen beeld vormen.

In het dal, dat zich tussen de beide zones bevindt, en neutrale zone wordt genoemd, is de lens in principe vlak. Daar wordt een lichtstraal dus niet gebroken, gaat rechtdoor en legt dezelfde weg af als bij afwezigheid van de lens. In zijn middenzone is de Schmidt-lens bol. Dit deel zorgt ervoor dat de stralen naar de optische as toe gebroken worden, waar-

door na reflectie het 'brandpunt' van die zone naar de spiegel toe schuift en zich verenigen op de plaats waar de bundel van de neutrale zone zijn 'brandpunt' heeft. In de randzone is het precies het omgekeerde. Daar worden de lichtstralen tengevolge van de negatieve werking van de optische as af gebroken en schuift het 'brandpunt' van die zone van de spiegel af en verenigt zich eveneens in het 'brandpunt' van de neutrale zone.

De Schmidt-optiek is zo krachtig dat een lichtsterkte bereikt kan worden van maar hefst 1,75.

Tegenwoordig heeft men met verbeterde fabricage-technieken zelfs openingsverhoudingen bereikt van 1 - dus de brandpuntsafstand is net zo groot als de diameter van de intreepupil.

Door de ongekend hoge lichtsterkte en de hoge afbeeldingskwaliteit is het veld dat in een keer gefotografeerd kan wor-

den ongekend groot: vele graden. Zo had het prototype van Schmidt, dat een opening had van 360 mm bij een brandpuntsafstand van 625 mm, een veld van ruim 16 graden. Het veld aan de hemel dat met een vergelijkbare scherpte hiermee gefotografeerd kon worden was meer dan 150.000 (!) keer zo groot als dat van de 2,5 meter spiegel. Over vooruitgang gesproken.

Fabricagemethode

Zoals eerder in dit artikel kon worden gelezen heeft Schmidt zijn fabricagemethode geheim gehouden. De eenvoud van zijn geniale oplossing zal wel zijn motivatie zijn geweest. Uit zijn technische studie wist hij dat een alzijdig opgelegde ronde plaat bij een gelijkmatige belasting volgens een kwadratische functie doorbuigt. Uit zijn kennis van de optica wist hij dat de fouten die optreden bij een zuiver sferische spiegel ook een

Mathematische beschrijving van de Schmidt-lens

Mathematisch kan de vorm van de Schmidt-lens worden beschreven als een rotatiesymmetrische (omwentelings)figuur van een hogere-orde-functie zonder oneven termen. Als de diameter van de neutrale zone 86,6% van de diameter van de intreepupil is luidt deze:

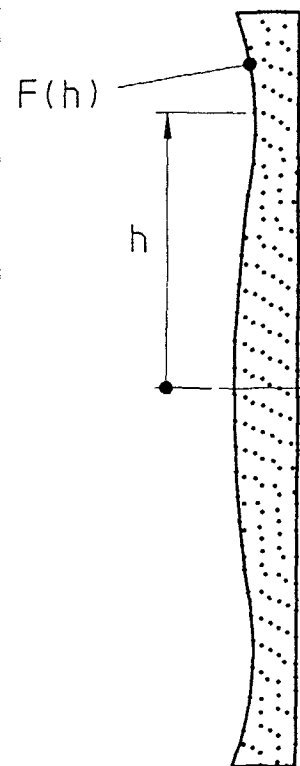
$$f(h) = \frac{D^2}{8 \cdot (n-1) \cdot r^3} \cdot h^2 + \frac{1}{4 \cdot (n-1) \cdot r^3} \cdot h^4$$

Hierin is:

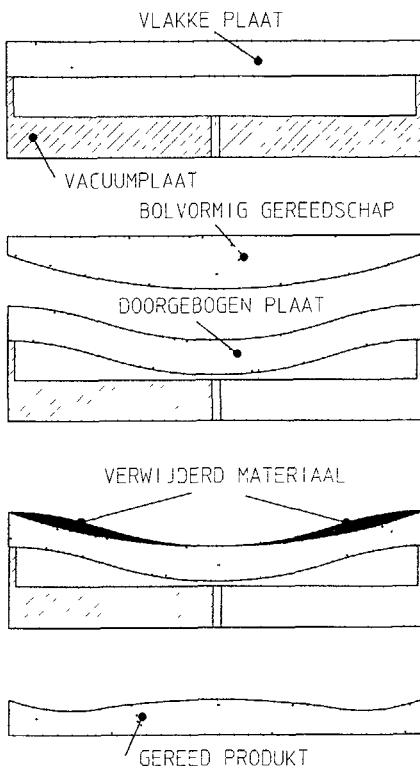
D: diameter van de intreepupil;
n: brekingsindex van het glas voor die kleur waarvoor het ontwerp wordt opgezet;
r: kromtestraal van de grote spiegel;
h: afstand van een punt van de beschrijven de tot de optische as.

Een neutrale zone met een diameter van 86,6% van de diameter van de intreepupil is een bijzondere keuze. Bij dit percentage is de kleurfout die ontstaat doordat glas voor elke kleur een andere brekingsindex heeft het kleinst.

Ondanks de complexe wiskunde die gangbaar is bij het ontwerpen van optische systemen bleek dat bij gebruik van een enkele sferische spiegel de vorm van de Schmidt-lens op deze ongekend eenvoudige wijze te beschrijven is.

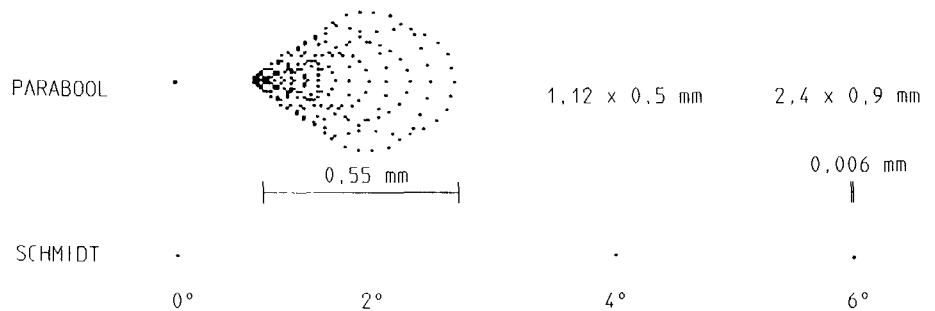


Ongekend hoge afbeeldingskwaliteit



Figuur 6 De fabricagemethode die Schmidt gebruikte bij het vervaardigen van zijn beroemde lens. De doorbuigingen en kromtestraal van het bolvormig gereedschap zijn sterk overdreven weergegeven

kwadratische functie zijn. Het geniale is nu dat hij inzag gebruik te kunnen maken van de doorbuiging van een ronde glasplaat, die aan zijn omtrek opgelegd is op een eveneens ronde wand van een vacuümkamer. Door het aanbrengen van onderdruk buigt de glasplaat rotatiesymmetrisch door. Met gereedschap waarop een bolvorm met de vereiste radius is aangebracht, kan dan deze bolvorm in de doorgebogen glasplaat worden geslepen.



Figuur 7 Weergave van de scherpte door middel van spot-diagrammen voor een 130 mm Schmidt-camera met een lichtsterkte van 2 bij beeldhoeken van 2, 4 en 6 graden vergeleken met eenzelfde parabolische spiegel bij dezelfde beeldhoeken en dezelfde lichtsterkte. Bij 4 en 6 graden beeldhoek was het niet mogelijk de spot-diagrammen weer te geven in verband met hun grote afmetingen

In het midden van de glasplaat wordt het minste materiaal verwijderd, wat ook het geval is aan de rand. Daar tussenin zal de bolvorm het meeste materiaal weghalen op de buigpunten van de doorgebogen plaat. Als vervolgens de onderdruk wordt opgeheven zal de plaat terugveren en de merkwaardig gevormde plaat overblijven. Het moge duidelijk zijn dat voor het verkrijgen van de transparantie de plaat ook in de opgespannen positie gepolijst dient te worden.

Het wordingsproces is weergegeven in figuur 6. Ook hier zijn de doorbuigingen en de pijlhoogten van het gereedschap sterk overdreven weergegeven.

Scherpte

De bereikbare scherpte wordt getoond in figuur 7. Op de bovenste rij staan de spot-diagrammen van een parabolische spiegel met dezelfde opening en brandpuntsafstand als die van een Schmidt-optiek in de onderste rij.

Niet alleen de zeer hoge scherpte op de optische as valt op, maar ook daarbuiten. Bij de parabolische spiegel is de

onscherpte buiten de optische zo groot dat alleen voor de eerste beeldhoek een spot-diagram is gegeven. De andere twee zouden veel te groot worden. De lichtsterkte van de systemen is 2. De beeldhoeken zijn op de optische as en 2, 4 en zes graden daarvan afwijkend. Het behoeft geen verder commentaar dat de afbeeldingskwaliteit van de Schmidt-optiek superieur is.

In het volgende Mikroniek wordt een Long Distance Microscop behandeld van Nederlands fabrikaat waarvan het optisch systeem een Schmidt-optiek is.

Literatuur

- [1] Telescope Optics, Evaluation and Design, H G J Ruten en M A M van Venrooy, Willmann Bell inc 1988, p 71
- [2] Handbuch zur Geschichte der Optik, Das Fernrohr, E H Schmitz, Verlag J P Wayenborg 1982, p 244
- [3] Das B Schmidtsche Verfahren bei der Herstellung der Korrektionsplatte fuer komafreie Spiegel, R Schorr, Zeitschrift fuer Instrumentkunde 56 (1936) p 336
- [4] Lens Design Fundamentals, R Kingslake, Academic Press, 1978, p 317
- [5] Astronomical Optics, D J Schroeder, Academic Press, 1987, p 55
- [6] Spiegeloptik, K Wenske, Verlag Dr Vehrenberg 1978, p 90, p 131