

Monolithisch telesysteem

Compacte objectieven met lange

afstand en korte bouwlengte, deel I

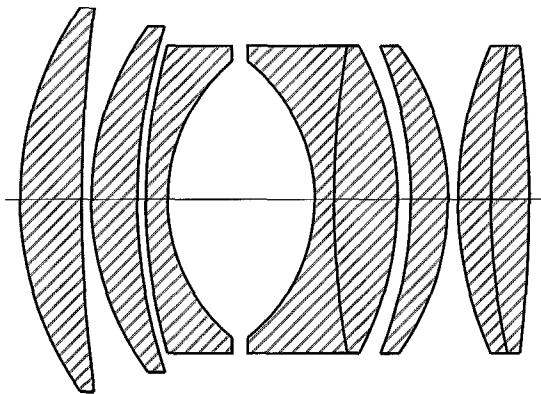
Harrie Rutten, Bart Postema, Rik ter Horst

Teleobjectieven voor fotografie- en video-systemen

kenmerken zich door hun, vaak, complexe opbouw met vele lenzen. Er zijn ook spiegelsystemen. Deze worden hoofdzakelijk gebruikt voor compacte objectieven met lange brandpuntsafstand en korte bouwlengte. Ook deze objectieven bezitten naast de twee noodzakelijke spiegels diverse lensdelen. De fa. Opticon uit Groningen is erin geslaagd een monolithisch systeem te ontwerpen en te vervaardigen. Dit artikel geeft een inleiding over de optica van lange brandpuntsystemen. Het latere deel 2 geeft het ontwikkelings- en vervaardigingspad van het monolithisch systeem.

Objectieven voor foto-, film en videocamera's bestaan over het algemeen uit een aantal lenzen. Figuur 1 toont een zeer hoogwaardig objectief met een grote lichtsterkte. Deze zijn opgebouwd uit enkelvoudige en/of meervoudige elementen. Meervoudige elementen wil zeggen dat lenzen aan elkaar gekit zijn.

Figuur 1 De opbouw van een objectief voor normale gezichtsvelden. Dit objectief heeft een hoge lichtsterkte en een hoge optische kwaliteit.



De toepassing van gekitte elementen heeft zowel voordelen als nadelen. De voordelen zijn dat een gekitte combinatie van lenzen heel goed gecentreerd kan worden. Hiermee wordt bedoeld dat de optische assen van de afzonderlijke lenzen in het kitdeel exact samenvallen. Een ander voordeel is dat er bij elk kitvlak twee reflectievlakken minder zijn. Daardoor is de kans op zogenaamde spookbeelden of inwendige reflecties duidelijk verminderd en zijn er bovendien per kitvlak twee vlakken minder die voorzien dienen te worden van een antireflexcoating. Omdat dit tegenwoordig vaak meerlaagse breedbandige coatingen zijn die wederom kostbaar zijn, vormt dit een aanzienlijke kostenreductie.

Er zijn ook nadelen, die allemaal ontwerpbeperkingen zijn. De eerste is dat de lensvlakken die gekit worden dezelfde kromtestraal dienen te bezitten. Een verdere

ontwerpbeperking is dat er geen luchtafstand gekozen kan worden tussen de beide elementen. Een zeer ingrijpende ontwerpbeperking is dat niet zonder meer alle verschillende optische glassoorten met elkaar gekit kunnen worden. De uitzettingscoëfficiënt van de verschillende glassoorten mag niet te ver uit elkaar liggen, anders bestaat er gevaar dat bij extreme temperaturen (bijvoorbeeld in arctische gebieden of in de tropen) de kitlaag verbroken wordt met alle gevolgen van dien. Verder dienen de glassoorten resistent te zijn tegen de gebruikte optische kit.

Voor het maken van gedetailleerde foto- of video-beelden van objecten op grotere afstand zijn tele-objectieven nodig. De telewerking berust er in feite op dat de brandpuntsafstand van zo'n objectief groter is dan van het standaard objectief, met een beeldveld dat dezelfde indruk geeft als bij waarneming met het ongewapende oog. Nu zijn er vele methoden om het detail dat men wenst te zien te vergroten. Bij fotografische technieken kan dit achteraf in de donkere kamer gebeuren door middel van een detailuitvergroting. Dit heeft dan het nadeel dat bij te sterke uitvergrotingen de korrel van het filmmateriaal zichtbaar wordt en op een gegeven moment de details als het ware verdwijnen in de korrel. In de digitale foto- en videografie is het niet anders. Daar is de film vervangen door een CCD-chip, een matrix van lichtgevoelige cellen, ook wel pixels genoemd, met afmetingen van circa 7 tot 25 micrometer, afhankelijk van fabrikaat en uitvoering. Uitvergrotingen worden dan gedaan met behulp van beeldbewerkingstechnieken. Details kleiner dan de afmetingen van zo'n pixel worden nooit zichtbaar. De bekendste resultaten die met deze technieken bereikt werden zijn wel die van de HST (Hubble Space Telescope). Bij deze was de primaire spiegel van bijna

Monolithisch teleoptisch systeem

twee en een halve meter diameter ten gevolge van een fabricagefout niet exact aan de juiste vorm. De vormfout van de spiegel bedroeg slechts 0,002 mm, maar dat was voldoende voor een onscherpe afbeelding. Omdat het ontwerpen en fabriceren van een correctoroptiek enige tijd kosten en de ruimtevlucht van een Space Shuttle om het zaakje te monteren ook nog een wachttijd veroorzaakt, is er een zeer geavanceerd beeldbewerkingsprogramma geschreven dat deze fouten een heel eind 'weg kon rekenen'.

Natuurlijk waren de afbeeldingen toen eenmaal de correctieoptiek was ingebouwd nog beter dan de bewerkte opnamen.

We gaan terug naar de gewone aardse (huis en tuin) fotografie. Om toch details te kunnen vastleggen worden objectieven gebruikt met grotere brandpuntsafstand. Bij een objectief met een brandpuntsafstand die vijf keer zo groot is dan van een standaardobjectief, is de afbeeldingsmaatstaf ook vijf keer zo groot en zijn dus vijf keer kleinere details zichtbaar. In de praktijk worden objectieven toegepast tot een circa 20x grotere brandpuntsafstand. Zouden deze objectieven dezelfde optische opbouw hebben als een standaardobjectief dan zou ook de grootte 20x zo groot zijn en het gewicht circa 8000x zo groot. Een standaardobjectief van 375 gram evenredig opgeschaald zou dan als teleobjectief 3 ton wegen. Dit alleen al in overweging nemen zou de grootste onzin zijn.

Bovendien zijn er nog andere redenen om niet over te gaan op een proportionele vergroting van een optisch systeem. Zou een objectief een factor twee in brandpuntsafstand worden vergroot en zou de optische opbouw met dezelfde verhouding mee vergroot worden, dan is de scherpte van een dergelijk objectief nog maar de helft. Het gezichtsveld is dan twee keer zo groot. Dit laatste is verspilde energie want de afbeelding van de beelddrager (filmformaat, ccd-chip) is

gelijk gebleven.

De relatie tussen beeldformaat en brandpuntsafstand is

$$\text{beeldhoek} = \arctan \frac{d}{2 \times F}$$

Hiern is d de diagonaal van de beelddrager of electro-nische opnamemedium en F de brandpuntsafstand van het objectief.

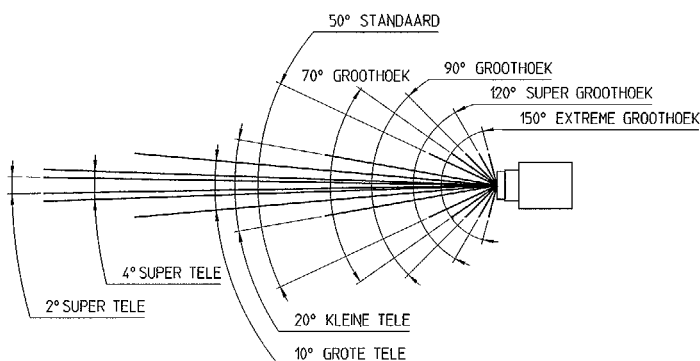
Figuur 2 laat de beeldhoeken zien van een aantal objectieven met hun benaming. De enige parameter die is veranderd is de brandpuntsafstand.

Doordat het gezichtsveld, daarmee wordt, de beeldhoek bedoeld, relatief gezien kleiner wordt, zijn de invallende bundels op de lensvlakken geringer en zijn de brekingen minder sterk. Hierdoor treden over het algemeen kleinere afbeeldingsfouten op en zijn reflecties, die afhankelijk zijn van de invallende hoek, ook kleiner. Daartegenover dient wel de absolute kwaliteit verhoogd te worden, want de scherpte die men wil bereiken moet natuurlijk minimaal gelijk blijven. Een ander punt dat bij de toepassing van een teleobjectief gewijzigd wordt, is de lichtsterkte van het optische systeem. Bij een gewone standaardlens is deze bijvoorbeeld 1,4, hetgeen wil zeggen dat de brandpuntsafstand 1,4 maal zo groot is als de opening. Bij telelensen zijn verhoudingen gebruikelijk van 2,8 voor lichtsterke, over het algemeen relatief korte, tot 11 voor lichtzwakkere en lange teleobjectieven.

De geringere lichtsterkte heeft weer tot gevolg dat onscherptes ten gevolge van afbeeldingsfouten minder sterk opzwellen omdat de kegel veel steiler is en een grotere scherpte gemakkelijker gehaald wordt dan bij een lichtsterk objectief. Dit kan het beste worden voorgesteld als de afbeeldingsfout ten gevolge van 'sferische aberratie', waarbij de stralen die aan de rand van het objectief binnentreden een andere ligging van het brandpunt hebben dan de stralen rond het centrum. Omdat de optische fouten niet lineair met de lensopening zijn maar kwadratisch of zelfs met de derde macht, betekent dit dat de opbouw van het optisch systeem er geheel anders uit kan zien.

Als de optische fouten tot een minimum zijn terug gebracht dan is de scherpte van de afbeelding verder afhankelijk van de nauwkeurigheid van focuseren. Indien het brandpunt niet exact op het filmvlak ligt, zal er een onscherpte optreden omdat het licht vanuit

Figuur 2 Beeldhoeken van diverse objectieven in vergelijking met een standaardobjectief



het objectief convergeert naar het brandpunt en er na weer divergeert. Die convergentie- en divergentie-hoek is afhankelijk van de lichtsterkte. De uiteindelijke scherpte van het beeld hangt daardoor af van de eigen scherpte van het objectief vermeerderd met die defocussing.

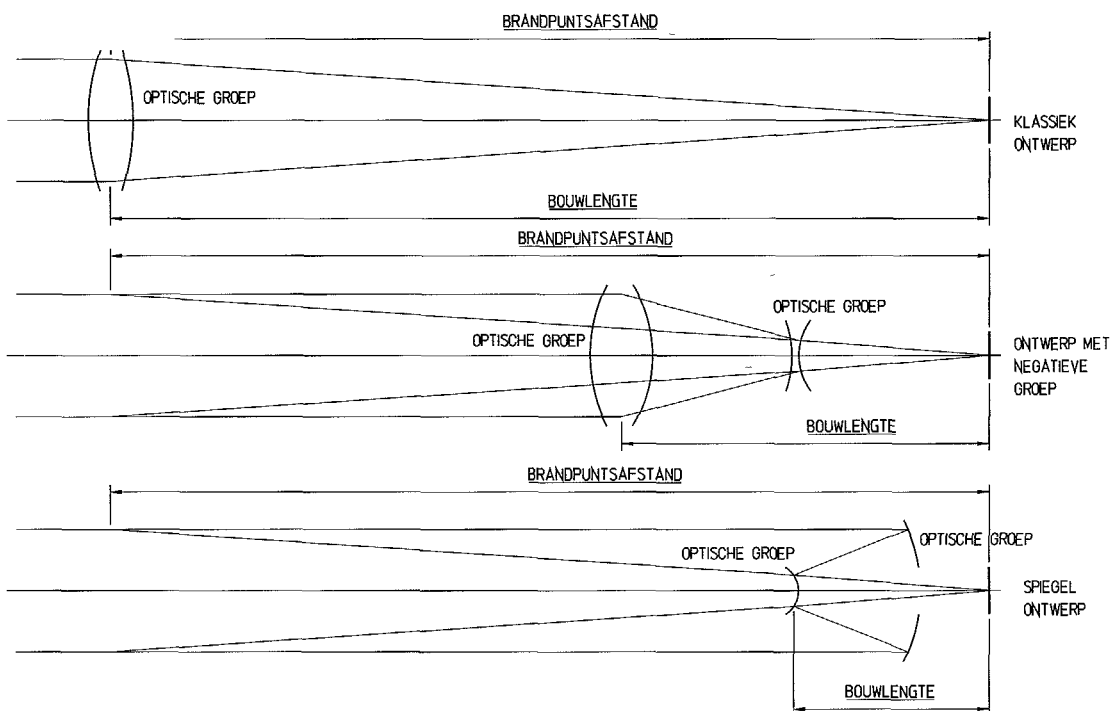
De relatie tussen de diameter van de onscherpte, door bijvoorbeeld defocussing is als volgt:

$$\text{onscherpte} = \frac{\text{defoc}}{2 \times N}$$

Hierin is *defoc* de defocussing in millimeter en *N* de lichtsterkte van het objectief. De onscherpte is dan in millimeters.

Omdat defocussing ook wordt veroorzaakt door afstellingsonnauwkeurigheden van de stand 'oneindig' is het van belang dat er een bepaalde reserve aanwezig is. Deze reserve moet worden opgebracht door het objectief zelf, dit betekent dat objectieven met een hogere lichtsterkte een betere optische correctie nodig hebben dan objectieven met een wat lagere lichtsterkte. Er zijn in dit opzicht dus twee moeilijkheden tegelijkertijd aanwezig. Een lichtsterker objectief is al moeilijker te ontwerpen en nu moet de focussing ook nog beter zijn.

Figuur 3 Bouwgroottes van enkele types objectiefontwerpen. Alle objectieven hebben dezelfde brandpuntsafstand.



Teleobjectieven

Zoals in de inleiding reeds werd aangeduid worden teleobjectieven gebruikt om detailopnamen te maken van over het algemeen verder verwijderde objecten. Sinds de uitvinding van de fotografie zijn er talloze ontwikkelingen geweest. Deze ontwikkelingen werden vooral gestuurd door de voortschrijdende kennis van de optica. Toen de theorie van de weg van het licht door een optisch systeem ontwikkeld werd, werd ook duidelijk waarom de afbeeldingsscherpte van een optisch systeem zo'n moeilijke zaak was. Men ontdekte dat er een aantal specifieke afbeeldingsfouten was [1], [2], [3]. Elk lensvlak bezit vier monochromatische en twee chromatische afbeeldingsfouten. Monochromatische afbeeldingsfouten geven onscherpte en zijn onafhankelijk van de kleur. Zij komen dus ook voor daar waar geen breking van het licht plaatsvindt. Chromatische afbeeldingsfouten ontstaan uitsluitend bij de breking van licht en komen dus niet voor bij spiegelende systemen. Verder is er één vertekeningfout die geen onscherpte veroorzaakt. Al deze afbeeldingsfouten kunnen zowel positief alsook negatief van aard zijn. Toch heeft het na de ontdekking van al die fouten nog heel lang geduurd totdat deze konden worden gekwantificeerd.

Voor dat het zover was werden nieuwe optiek-ontwerpen eerder ontdekt op basis van trial and error en op basis van ervaring dan door het maken van een ontwerp. Halverwege de vorige eeuw werd duidelijk dat

aan de hand van een bepaalde, benaderende rekenmethode die hier met verder uitgelegd wordt, het mogelijk was van te voren een uitspraak te doen over de optische kwaliteit van een bepaald optisch systeem. In die tijd waren objectieven echter met lichtsterk en was het aantal glassoorten beperkt. Daarbij hadden die glassoorten over het hele spectrum een vergelijkbaar gedrag. Immers, de brekingsindex voor de kleur blauw is bij glas hoger dan die voor rood. Het verschil wordt dispersie genoemd.

Monolithisch teleoptisch systeem

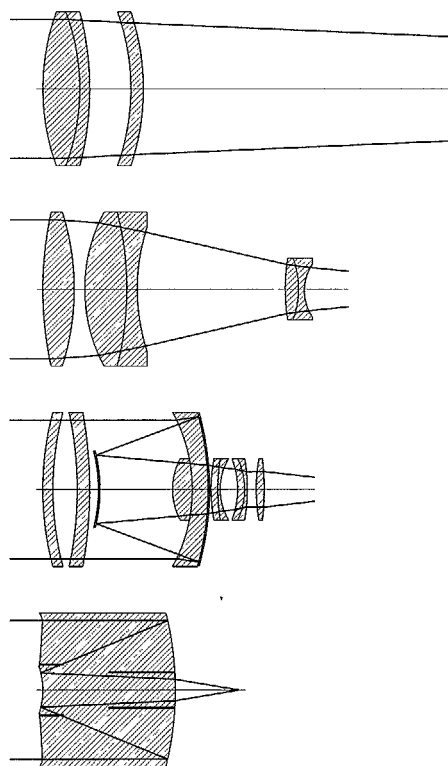
Een andere belangrijke parameter waren de steeds nieuwe glassoorten die ontwikkeld werden met hogere en lagere brekingsindices, beide met sterk afwijkende dispersie. Dit heeft als belangrijkste resultaat gehad dat lichtsterktes sterk verbeterd konden worden, een betere optische kwaliteit werd verkregen en bouwlengtes aanmerkelijk verkort konden worden. Belangrijk element in de ontwikkeling bij teleobjectieven was een sterke negatieve groep in de buurt van het focus. Daardoor kon de bouwlengte nog eens aanmerkelijk verkort worden. In figuur 3 is het principe van deze ontwerpwijze weergegeven.

Nadeel van deze constructie was dat kleurfouten moeilijk te corrigeren waren, hetgeen later weer vereenvoudigd werd door nieuwere glassoorten.

Het resultaat van de ene uitdaging vormde telkens de basis voor een nieuwe. Zo kwamen beide op een hoger niveau.

In het begin van de jaren vijftig is daardoor een hele nieuwe ontwikkeling ontstaan: spiegelobjectieven. Met deze ontwikkeling zijn de kortste ontwerpen mogelijk. Dit vindt zijn oorzaak in het feit dat de optische sterkte van een materiaal bepaald wordt door zijn brekingsindex. Bij een gewoon glas is deze 1,5 en bij een hoogbrekend glas 1,9. De sterkte is $n-1$ en is dus respectievelijk 0,5 en 0,9. Bij een spiegelvlak keert de richting van het licht om hetgeen gesteld kan worden als brekingsin-

Figuur 4 Optische opbouw van teleobjectieven volgens de verschillende ontwerp-types. Let op de eenvoud van het onderste systeem het monolithische teleoptisch systeem.



dex -1 . Daardoor wordt de sterkte van een spiegelvlak -2 , een factor 2 tot 4 sterker dan die van glas. Bovendien treedt bij een spiegeling geen kleurfout op. Om het licht dat door een holle spiegel weer in de objectrichting wordt teruggekaatst, toch op de film of ccd-chip te krijgen, is een tweede spiegel nodig, de secundaire spiegel genoemd. Door de secundaire spiegel werd een deel van het licht weggenomen. Dit hindert echter niet, de gebruiker had het er graag voor over, want een objectief dat een bouwlengte heeft van slechts $1/5$ van de brandpuntsafstand is natuurlijk uiterst aantrekkelijk.

Daarentegen ontstond weer een ander probleem. Spiegels zijn dermate sterke optisch werkzame vlakken dat de kromming van het beeldveld, een van de vier fouten die onscherpte veroorzaakt, sterker werd en ook dit weer gecorrigeerd moest worden. Al met al werden de systemen dus weer gecompliceerd.

Figuur 4 geeft een voorbeeld hoe van elke type objectief een mogelijke uitvoering er uitziet. Duidelijk is dat naarmate de bouwvorm korter wordt de complexiteit van het optische systeem toeneemt. Met uitzondering van het onderste systeem, de monolith van de fa. Opticon waar het in dit artikel over gaat.

Een fenomeen dat nog niet aan de orde is geweest zijn reflecties. Aan elke overgang van een optisch element naar een ander medium ontstaan reflecties. De sterkste reflecties ontstaan aan glas-lucht of lucht-glas overgangen. Om deze reden zijn antireflexcoatings ontwikkeld. Bij normaal, laagbrekend, glas is de reflectie ongeveer 5%, bij moderne, hoogbrekende, glassoorten kan dit oplopen tot ongeveer 11%. Bij een gemiddelde van 7% en acht glas-lucht of lucht-glas overgangen is er dus al een verlies van maar liefst 44%. Met moderne coatings kan dit terug gebracht worden tot enkele procenten. Deze coatings zijn echter kostbaar. Ondanks dit goede resultaat zijn bij ongunstige belichting, bijvoorbeeld bij sterk tegenlicht ten gevolge van de zon of verlichtingsbronnen, in het beeld sterke of minder sterke interne reflecties te zien. Deze geven niet alleen groot informatieverlies op de plaats waar een reflectie zich manifesteert maar als een groot contrastverlies over het hele veld.

Literatuur:

- [1] Inleiding in de optica, H G J. Rutten, Mikroniek 26 (1986) 4
- [2] Inleiding in de optica, H G J. Rutten, Mikroniek 26 (1986) 5.
- [3] Inleiding in de optica, H G J. Rutten, Mikroniek 26 (1986) 6