

Asferische optiek – waarom vereist en hoe vervaardigd

Erich Haynacher, Labor für aspherische Flächen, Carl Zeiss, Oberkochen.

Wat is asferische optiek?

Normaal zijn alle brekende of spiegelende vlakken in optische systemen bolvormig of vlak; men spreekt dan van sferische optiek. Daartegenover staat de optiek met 'asferische' (niet-sferische) vlakken. De optiekconstructeurs zouden het liefst slechts asferische optiek toepassen; maar asferische optiek is dan slechts goedkoop te vervaardigen indien een geringe precisie wordt vereist (bijv. kondensoroptiek). Bij hoge precisie (bijv. astronomische telescopen) is zij belangrijk duurder dan als sferische optiek. Waarom de optiekconstructeurs asferische producten willen, waarom deze duurder zijn dan sferische producten en wat er wordt gedaan om asferische optiek ook in apparatenoptiek en in fotografische objectieven voor amateursgebruik te kunnen toepassen, zal, in de volgende bijdrage worden besproken.

Waarom optiek met asferische onderdelen?

Wij willen bij deze vraag een korte historische beschouwing houden: Bij de wis-seling van de 16e naar de 17e eeuw be-gint men zich intensief bezig te houden met de optiek en met asferische vlakken. Vanuit de oudheid en de middeleeuwen was het bekend, dat voor het afbeelden van een oneindig ver verwijderd punt door reflexie een parabolische spiegel noodzakelijk is. In een boek stelt Johan-nes Kepler in 1611 het gebruik van ke-gelsneden bij spiegels en lenzen voor. Voor lenzen kan hij dit nog niet weten-schappelijk ondersteunen, want hij kent de brekingswet nog niet. Deze wet wordt eerst in 1618 door Snellius (Wille-brord Snell van Royen) en daarna nog eens door René Descartes ontdekt. Hier-mee gewapend kan Descartes (1) in 1638 de eerste steen leggen voor het gebied van de asferische optiek. Hij toont aan welke vorm lensoppervlakken moeten hebben opdat voor eindige of oneindige voorwerpsafstand een aberratievrije af-beelding van assenpunten ontstaat. De vlakken die hij daarvoor ontdekt worden heden nog te zijner ere cartesische vlak-ken genoemd.

Een verdere, hoogst interessante, bijdra-ge op het gebied van de berekening van asferische vlakken stamt van Christiaan Huygens (2). Hij stelde in 1678 het kon-struktieprincipe op dat bij de aberratie-vrije afbeelding van een punt alle wegen van het licht van object naar beeldpunt

gelijk moeten zijn.

Tot aan het einde van de 19e eeuw was het doel van alle toepassingen van asferi-sche onderdelen het opheffen van de sferische aberratie. Ernst Abbe (3) on-derkende eerst in 1899, dat men asferi-sche onderdelen ook kan gebruiken voor de correctie van het astigmatisme van scheve bundels. Praktisch tegelijkertijd zette een intensieve bezigheid met spie-gelteleskopen in Men eiste systemen die het toelieten om bij grote lichtsterkte grote beeldvlakken af te beelden. De klassieke telescopen zijn hiertoe niet ge-schikt omdat daarbij koma optreedt. Vooral het werk van Karl Schwarzschild (4) en Henri Crétien (5) leidde tot de ont-wikkeling van aplanatische spiegelsyste-men. Thans gebruikt men asferische producten voor de correctie van sferi-sche afwijking, koma, astigmatisme, vertekening, voor het vermijden van chromatische fouten maar ook voor de opheffing van pupilaberratie. Daarbij blijkt het bij gekompliceerde optische systemen niet zinvol meer te zijn om de beeldfouten gescheiden te behandelen, omdat de correctie van alle beeldfouten als één geheel moeten worden be-schouwd.

Volgens hedendaagse inzichten kan men de waarde van asferische vlakken zelf en in vergelijking met andere kor-rektiemiddelen beter als volgt verklaren: Om de gewenste verbeteringen te berei-ken – bijv. verbetering van de samen-komst van stralen, verhoging van de

lichtsterkte, vergroting van de beeld-hoek, vermindering van afmetingen en gewicht, vervulling van moeilijke in-bouwvoorwaarden, mogelijkheid tot va-riëren van de brandpuntsafstand (zoom-systemen), vergroting van de reikwijdte met een uitstekende afbeelding (door 'floating elements'), verbetering van de chromatische correctie – moet men *meer* beeldfouten corrigeren. Daartoe heeft men *meer* parameters nodig die men kan variëren.

Op grond hiervan

- is het aantal gebruikte lenzen in de loop der jaren gestadig gestegen
- gebruikt men steeds buitenissiger glazen
- past men asferische onderdelen toe voor zover de vooruitgang in de pro-ductietechnologie dit mogelijk maakt.

Asferische delen zijn het meest effectie-ve en elegantste middel voor de opzet van meer systeemparemeters. Men zou ze slechts tegen gunstige kosten moeten kunnen vervaardigen! In het volgende willen wij ons op dit probleem richten.

Precisie van optische vlakken

Als ingang tot de problematiek van de vervaardiging van asferische vlakken wil-len we eerst de precisie van optische vlakken in beschouwing nemen. Wan-neer men van oppervlaktetolerantie ' $\lambda/4$ ' spreekt, dan betekent dit voor een spie-gelvlak dat de toelaatbare afwijkingen $0,075 \mu\text{m}$ bedragen. Dat is ongeveer $1/1000$ van de dikte van een haar en een goede tiendemacht minder dan die wij van precisiemachines voor mechanische producten gewend zijn.

Het geheim waarom men deze onvoor-stelbare precisie bij het vervaardigen van sferische vlakken bereiken kan, ligt in de oppervlakteaanraking tussen werktuig en werkstuk. Dit brengt een wederzijds inslijpen teweeg, waardoor uitgaande van vlakken met foutieve vorm op het werktuig en op het werkstuk, aan het einde beide vlakken een hoge precisie vertonen. De precisie van de machine waarop de vervaardiging plaats heeft is van ondergeschikt belang.

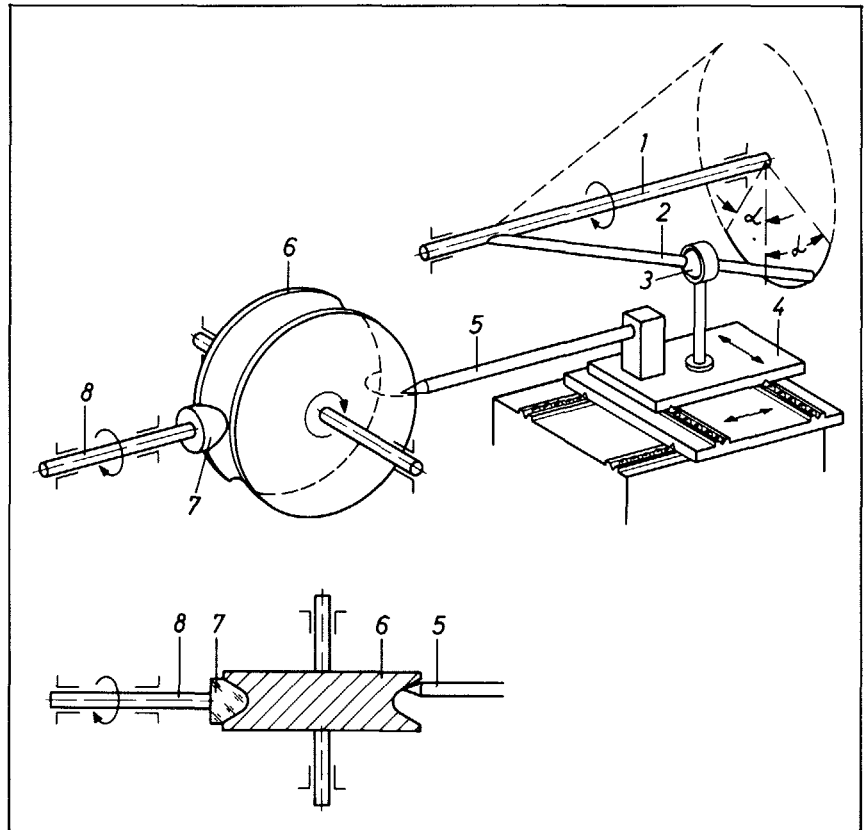
Bij de vormgevende bewerking van asfe-rische vlakken is een puntvormige aanra-

king tussen werktuig en werkstuk regel. Daardoor komt er geen stabiliseringseffect zoals bij de sferische bewerking tot stand en de geometrie van de machine, de precisie van de lageringen en geleidingen en de stijfheid van de opbouw moeten volledig aan de beoogde precisie van het werkstuk aangepast worden. Dat was tot voor kort een onoplosbaar probleem. Wegens de principiële moeilijkheden is het zeer interessant en leerrijk om de geschiedenis van de machine-ontwikkelingen voor asferische vlakken te bestuderen. Wij willen hier de belangrijkste gedachten schetsen:

Voorzieningen voor de vormgevende bewerking, een historisch overzicht.

Het belangrijkste voorbeeld, waarbij oppervlakte-aanraking tussen werktuig en werkstuk in de praktijk verwezenlijkt kan worden, is de astronomische spiegel. Hier is in verhouding de asferische afwijking (in vakjargon 'deformatie' genoemd) van een bolvlak ter grootte van het werkstuk zo extreem klein, dat men – uitgaande van een gepolijst bolvlak – met een klein, enigszins flexibel werktuig de benodigde deformatie kan 'inpolijsten'. Met de grootte van de verhouding van de deformatie tot de diameter groeien de moeilijkheden voor dit procédé en wordt een punt bereikt waarbij men de vlak-aanraking van het werktuig moet opgeven. Men heeft daarna getracht tenminste een lijnvormige aanraking tussen gereedschap en werkstuk te bereiken. Een vroeg voorbeeld daarvan is een door Descartes voorgestelde machine (1) (fig. 1). Een grote slijpsteen wordt op zijn mantelvlak met een beetelachtig stuk gereedschap asferisch gevormd. Het gereedschap wordt op de gewenste kegelsnedebaan (bijv. een paraboolbaan) met behulp van een hefboomstelsel geleid. Het gereedschap wordt tegen de slijpsteen gedruwd en raakt deze langs zijn meridiaanlijn. Het voordeel van dit konstruktie-idee kan echter geen effect hebben doordat de bereikbare precisie door de lageringen en geleidingen voor het puntvormig aanliggende dressgereedschap wordt bepaald.

Wat de vraag betreft hoe men de ideale vorm van het gereedschap tot stand brengt, had reeds in 1669 Sir Christopher Wren (6) (de bouwmeester van de St. Paul's Cathedral in London) een geniaal idee (fig. 2). Voor de vervaardiging van een hyperbolische vangspiegel worden twee cilindroiden boven het werkstuk geplaatst. Hun assen staan onder een bepaalde hoek t.o.v. elkaar.

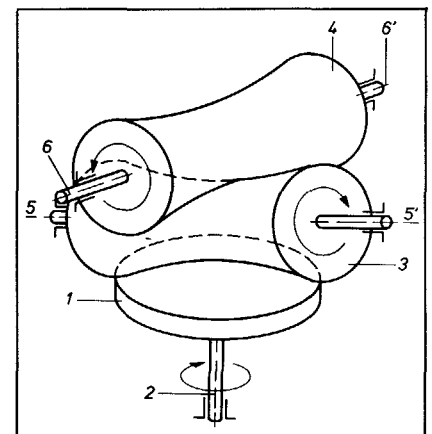


Figuur 1 Principe van de machine van Descartes voor asferische elementen (1). De met de as 1 star verbonden stang 2 draait om een kegelmantel over de hoek $\pm \alpha$ heen en weer. Daardoor beschrijft het kogelgewricht 3, dat verschuifbaar op stang 2 is aangebracht in een vlak parallel aan het tafelopervlak, de geometrische figuur van een kegelsnede. Tafel 4 is als kruistafel uitgevoerd. Deze draagt het addressgereedschap 5, dat in de mantellijn van de grote slijpsteen 6 de kegelsnede overbrengt. Het werkstuk 7 op de draaiingsas 8 wordt tegen de slijpsteen gedrukt en verkrijgt zo de gewenste asferische vorm.

Daardoor ontstaan door wederzijds inslijpen lichamen met een hyperbolische mantellijn. Deze wordt op het werkstuk overgebracht. Ondanks zulke geniale uitvindingen bleef het probleem destijds onoplosbaar. Een lijnaanraking kan bovendien slechts in zeldzame gevallen tot stand worden gebracht.

Zo werden in de 18e eeuw slechts op het gebied van het polijsten bij asferische vlakken resultaten bereikt. Oude verrijkers werden door bijwerken van één vlak zolang gedeformeerd tot de kwaliteit van de afbeelding voldoende was. Hier is sprake van deformatiebedragen van slechts enkele λ , dus om de grootteorde van μm . Daardoor kon men werken met vlak-aanraking.

Het vervaardigen van asferische vlakke met nagenoeg puntvormige aanraking tussen gereedschap en werkstuk kwam praktisch in het geheel niet in aanmerking, zelfs wanneer men kinematische konstrukties bedacht waarbij het gereedschap op de gewenste asferische vorm geleid wordt (men interesseerde zich destijds slechts in kegelsneden).

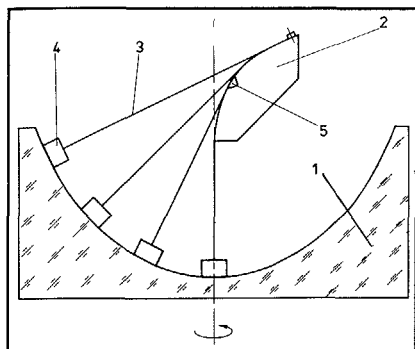


Figuur 2 Principe van het voorstel van CHR. WREN (6) voor de vervaardiging van een hyperbolische vangspiegel. Wij kijken schuin van boven op het werkstuk 1, dat op een draaitafel met as 2 bevestigd is. Daarboven zijn twee 'botachtige' slijpgereedschappen 3 en 4 met nauwkeurig berekende en ingestelde hoek tussen de draaiassen 5, 5' en 6, 6' aangebracht. Door wederzijds inslijpen verkrijgen de slijpgereedschappen 3 en 4 een hyperbolische vorm van de mantellijn. Deze wordt door het onderste gereedschap 3 overgebracht op het werkstuk 1.

De mechanische lageringen, assen en langsgelidingen konden eenvoudig niet met de vereiste precisie worden vervaardigd.

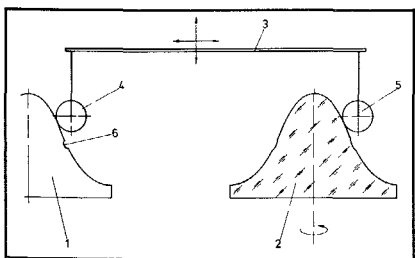
Toch konden in de tweede helft van de vorige eeuw, toen de vraag naar zoeklichtspiegels zeer groot werd, opmerkelijke resultaten worden bereikt.

Een bijzonder mooie kunstgreep, waarmee men ondanks de begrensde mechanische mogelijkheden zijn doel kon bereiken, is het evolutenprocédé (fig. 3).



Figuur 3 Principe van het evoluteprocédé. Boven het werkstuk 1 is de evoluteschabloon 2 aangebracht. Aan de evolute is een stalen band bevestigd, die steeds strak wordt gehouden. Deze draagt het gereedschap 4, dat daardoor langs de baan van de gewenste asferische vorm geleid wordt. Een fout 5 in het schabloon wordt op de asferische vorm slechts sterk verkleind overgebracht.

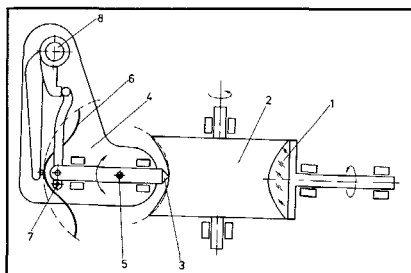
Als model voor het te vervaardigen asferische werkstuk maakt men geen schabloon met de vorm van de meridiaankromme van de asferische vorm (principe van de in de natijd voor asferische producten van lagere nauwkeurigheid veel gebruikte kopieermachine, vgl. fig. 4) maar geleidt het gereedschap aan een



Figuur 4 Principe van de kopieermachine. Schabloon heeft de vorm van de te vervaardigen mantellijn van werkstuk 2. Een niet kantelbare zijwaarts- en hoogtegeleiding 3 draagt een kopieerwiel 4 en het even grote slijpwerktuig 5. Een fout 6 in het schabloon wordt vanwege de eindige straal van de frees 5 slechts verzwakt op het werkstuk overgebracht, maar werkt in hogere mate door dan bij de evoluteopstelling (Fig. 3).

band naar de evolute van het te maken asferische product. Dat heeft het voordeel, dat de vervaardigingsfouten van het schabloon, die bij de kopieerinrichting volledig worden overgebracht, hier slechts sterk verkleind optreden. Het evolutenprocédé beperkt zich niet tot kegelsneden. Voorwaarde voor toepassing is slechts dat de evolute geen keerpunt heeft.

Van de in de 20e eeuw gekonstrueerde asferenmachines zou ik voor alles een machine willen beschrijven die aan het eind van de twintiger jaren door Mackensen werd opgezet (7). Deze omvat meerdere gunstige konstruktieideeën, wat uit het voorgaande gemakkelijk is te begrijpen (fig. 5):



Figuur 5 Principe van de asferische slijpmachine van MACKENSEN (7). Werkstuk 1 wordt aan het slijpgereedschap 2 in lijnvormige aanraking ingeslepen. Het slijpgereedschap wordt in de juiste vorm gehouden door een afdressgereedschap 3 dat in een zwenkinrichting 4 met het draaipunt 5 aangebracht is. Voor de vervaardiging van een asferische vorm behoeft het afdressgereedschap bij het zwenken maar weinig te worden bewogen. Daardoor kan een sterke hefboomverkleining worden gebruikt waardoor de fouten van het kurvenschabloon 6 overeenkomstig worden verkleind. De assen 7 en 8 zijn aan de zwenkinrichting 4 bevestigd.

- Het principe van lijnvormige aanraking tussen gereedschap en werkstuk.
- Het principe van het doorlopend nakorrigeren van het gereedschap en daardoor het behouden van de gewenste vorm.
- Het principe van de geleiding van het gereedschap - in dit geval het dressgereedschap - in een aangepaste polaire coördinatensysteem wat naast het evolutenprocédé een andere mogelijkheid oplevert om de beperkingen van de precisie bij de vervaardiging van kopieerschablonen te overwinnen, hier door een sterk verkleinende hefboom-overbrenging.

Met deze machine werd een voor die tijd uitstekende precisie bereikt, voor alles

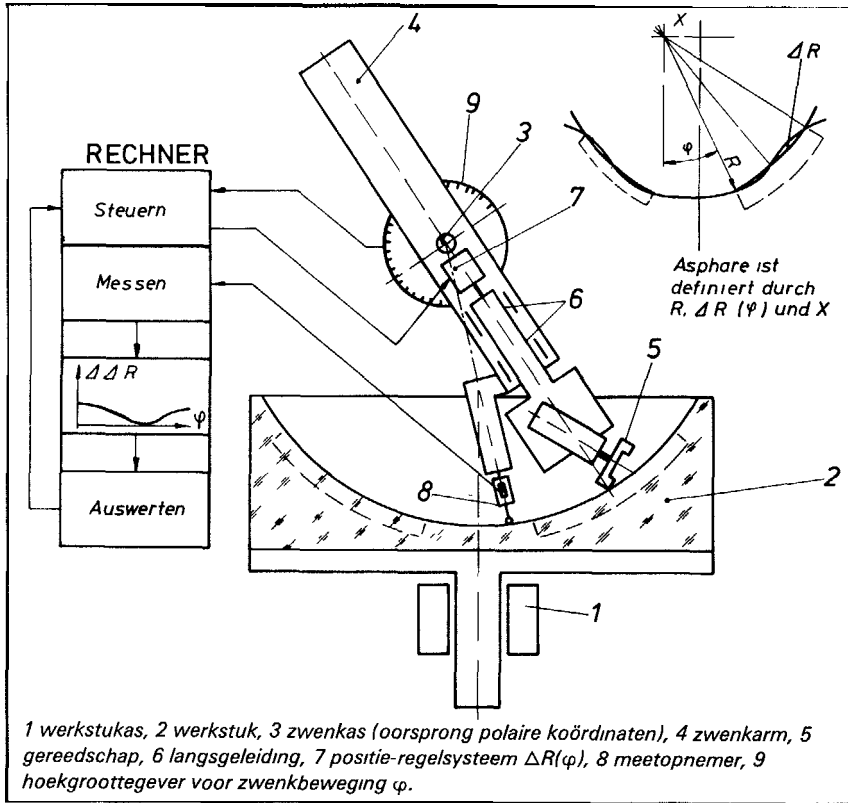
met het oog op kortgolvlige fouten. De gereedschapsgeleiding in polaire coördinaten is een veel gebruikt konstruktieprincipe geworden. Naast de Mackensenmachine kennen wij een ongeveer 20 jaar oude konstruktie van onze firma, verscheidene inrichtingen van Rank-Taylor-Hobson en Japanse fabrikaten. In de tweede helft van deze eeuw werd er een nieuwe mogelijkheid toegevoegd om de gereedschapsgeleiding langs een bepaalde baan met een hoge precisie te bereiken, namelijk de besturing met behulp van een computer.

De eerste inrichting van deze soort werd door A. Cox en M.F. Royston (8) bij Bell & Howell beschreven. Bij deze machine wordt het gereedschap in cartesische coördinaten geleid. Men ziet af van alle kunstgrepen die door de voorgangers op het gebied van asferische bewerking bedacht werden om beperkingen van de nauwkeurigheid van de mechanische delen te overwinnen en men tracht het probleem onder de knie te krijgen met het nieuwe krachtmiddel, computerbesturing. Of dit in volle omvang gelukt is werd niet bekend. Wij hebben bij onze nieuwe ontwikkelingen geprobeerd zoveel mogelijk de grondideeën van vroegere ontwikkelingen over te nemen om zo tot een konstruktie te komen, waarmee het doel mogelijk spelenderwijs bereikt kan worden. Bijzonder belangrijk waren daarbij de problemen van het eenvoudig justeren en de bediening, de zo snel mogelijke bepaling van de restfouten van het verloop van de asferische vorm en hun opheffing bij de volgende bewerkingstrap.

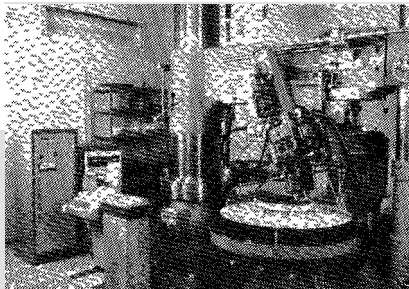
Verdere bijzonderheden betreffende een moderne machine van Zeiss, Oberkochen

Wij beschrijven hierna een volgens deze gezichtspunten bij Zeiss ontwikkelde machine (9), zoals deze bijv. nodig is voor de vervaardiging van buitenaxiale paraboolspiegels voor moderne spektraalapparaten. In fig. 6 wordt het principe getoond. In werkstuk 2 is de te vervaardigen snede uit een asferisch rotatievlak aangegeven. Wij zoeken een meridiaancirkel op, die de asferische vorm zo nauwkeurig mogelijk benadert.

Het middelpunt ligt niet op de rotatieas. R is de straal van de cirkel die we de pascirkel noemen, ΔR de afwijking van de asferische vorm van de pascirkel, φ de polaire hoek. De oorsprong van het coördinatensysteem wordt door de as van een uiterst nauwkeurige spindel gerealiiseerd, de straal met behulp van een zwenkarm. Deze bezit een langsgel



Figuur 6 Principe van een moderne asferische machine met computerbesturing. De machine is gelijktijdig bewerkings- en meetmachine. De computer levert de stuurfunctie voor de bewerking, vergelijkt bij meten het meetresultaat met de instelfunctie en verschaft indien nodig een korrektiefunctie, met behulp waarvan de vastgestelde afwijkingen bij de volgende slijpbewerking worden gekompenseerd



Figuur 7 Machine voor asferische vormen A 800 met computerbesturing, Vgl principeschets Fig. 6.

ding. Voor aan de slede zit het slijp gereedschap. De slede wordt met behulp van een kopieerbesturing bewogen; deze verzorgt de functie $\Delta R = \Delta R(\varphi)$. Als funktiegever diende oorspronkelijk een in R- en φ -richting verhoogde kurveschijf, die door een inductieve meetopnemer wordt afgetast. Tegenwoordig gebruiken wij een besturing met procescomputer, die nauwkeuriger is en een veel grotere flexibiliteit bezit.

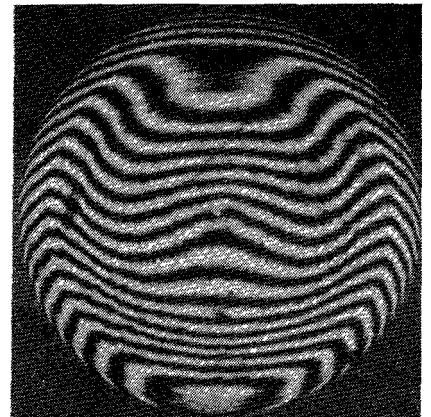
Aan de zwenkarm is behalve het gereedschap ook een inductieve meetopnemer bevestigd. De machine is dus gelijktijdig productie- en meetmachine. Men kan daardoor snel na de bewerking vaststel-

len hoe het vlak is uitgevallen. Daarbij wordt de door de opnemer gemeten afwijking ΔR_2 met de in de computer opgeslagen instelfunctie ΔR_1 vergeleken en de afwijking $\Delta R_2 - \Delta R_1$ op een kompensatieschrijver geregistreerd. De vastgestelde afwijking van de instelwaarde kan, indien nodig, als korrektiefunctie in de computer worden ingevoerd en kan daar bij de volgende slijpbewerking rekening mee worden gehouden.

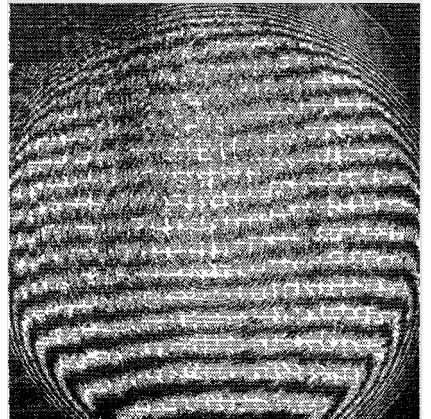
Ook bij de besturing met behulp van een procescomputer zijn kleine meet- en besturingswegen voordelig omdat we ze kunnen volstaan met kleine woordlengten, kleine geheugenkapaciteit en eenvoudige interpolatieroutines en de besturing analoog kunnen doen plaatsvinden. Uit een mechanisch oogpunt zijn kleine gradiënten $d\Delta R/d\varphi$ tevens van voordeel. De besturing van de computer vindt plaats met behulp van een hoekgever en de coördinatenas met een groot oplossend vermogen. Deze geeft de impulsen volgens welke de computer de opgeslagen besturingswaarden afgeeft. Door een passende geometrie van de machine kan men dus gunstige voorwaarden scheppen voor een uiterst nauwkeurige meet- en besturingstech-

niek. Hoe is het echter gesteld met de precisie van de bewegende machineonderdelen? Ook hier bestaan sedert enkele jaren nieuwe mogelijkheden door toepassing van hydraulische lageringen. Wij hebben alle lageringen hydrostatisch en hydrodynamisch uitgevoerd. Deze elementen bereiken de gewenste lagernauwkeurigheden van enkele honderdsten μm , hebben grote stijfheden en zijn vrij van slijtage.

Volgens hetzelfde principe werd nog een inrichting gebouwd voor werkstukken tot ongeveer 100 mm \varnothing en die zich onderscheiden door een breed toepassingsbereik van sterk holle over nagenoeg vlakke tot sterk bolle asferische vormen. De gewenste nauwkeurigheden werden bereikt, tevens de mikroskopische kwaliteit van het oppervlak. De oppervlakken kunnen in de meeste gevallen (afhankelijk van de glassoort) in fijngeslepen toestand interferometrisch worden gekeurd of met behulp, van een

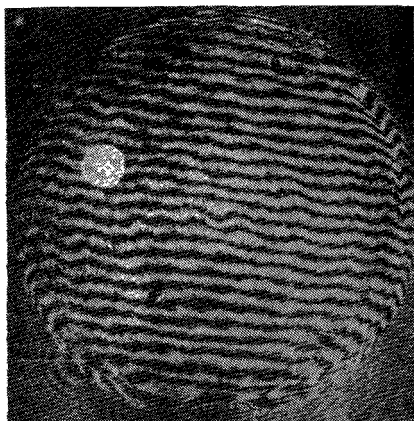


Figuur 8 Interferogram voor een lens uit kwartsglas, diameter 30 mm, fijngefreesd met korrel D 15. De beproevingsstralengang is niet volledig gekompenseerd.



Figuur 9 Interferogram voor een glazen matrijs uit BK7-glas. Het optisch gebruikte gebied is 10 mm \varnothing , het zichtbare gebied is 12 mm \varnothing . Fijngefreesd met diamantkorrel D 7. Lensoppervlak ter verbetering van het contrast van de interferentielijnen licht geolied.

dunne olielaag daarvoor geschikt worden gemaakt. De interferentiepatronen (fig. 8 - 10) geven enkele voorbeelden.



Figuur 10 Interferogram voor een lens uit BK7-glas met 200 mm ϕ , fijngefreed met D 15-20, lensoppervlak licht geolied.

De polijsttechniek

De vormgevende bewerking vormt weliswaar het kernpunt van asferische technologie, maar gebleken is, dat ook het polijsten van de asferische vlakken zeer moeilijk is. Het probleem zelf is duidelijk, het glad maken van de asferische vorm, verkregen door de vormgevende bewerking, zonder deze vorm te veranderen, resp. zo nodig de gewenste vorm nog nauwkeuriger te verwezenlijken. Des te moeilijker ziet het er in de praktijk uit. Om een glad optisch oppervlak te bereiken moeten we een gereedschap gebruiken dat minstens op een deelgebied van het werkstuk zo mogelijk volledig aanligt. Dat is bij een sterke asferische vorm echt problematisch. Er worden deels enorme eisen gesteld aan de veereigenschappen van het gereedschap, opdat dit aan het eind uit de asferische vorm niet weer een kogel gemaakt heeft. Anderzijds moet het in het mikrogebied als een schaaft werken, toppen wegnemen en een optische gladheid teweegbrengen.

Het bleek van voordeel te zijn om het polijstwerk in twee gedeeltes te splitsen: Het eerste deel is het zg. polijsten van het gehele vlak. Hierbij komt het zeer flexibele gereedschap gelijktijdig in aanraking met het gehele oppervlak van het werkstuk. Daardoor kan niet worden voorkomen, dat het oppervlak een geringe verandering ondergaat. De verst vooruit stekende gedeeltes worden in sterkere mate weggenomen dan de meer terugliggende. Men probeert bij dit proces de bewerkingsvoorwaarden zo goed mogelijk konstant te houden. Dan is de nasturing gering en wanneer men bij de vormgevende bewerking vooraf de bij het polijsten te verwachten gemiddelde vorm-

verandering heeft gekompenseerd, is men bij het einde van de bewerking het doel zeer nabij gekomen. Bij niet te hoge eisen resp. niet te hoge moeilijkheidsgraad van de asferische vorm, kan men alleen volstaan met het polijsten van het gehele vlak.

Waar dit niet het geval is moet als tweede gedeelte een fijnkorrektie van de oppervlaktevorm plaatsvinden. Hier werkt men met gereedschappen waarvan het aanrakingsvlak klein is ten opzichte van het oppervlak van het werkstuk, om doelgericht de afname daar te doen plaatsvinden, waar nog te veel materiaal aanwezig is. Voor het vaststellen van de afwijkingen en de controle van het bewerkingsresultaat past men tegenwoordig bijna uitsluitend de interferometerbeproeving toe. Zij is ook een goede basis voor een automatisering van het fijnkorrektieproces.

Interferometrische beproevingstechniek

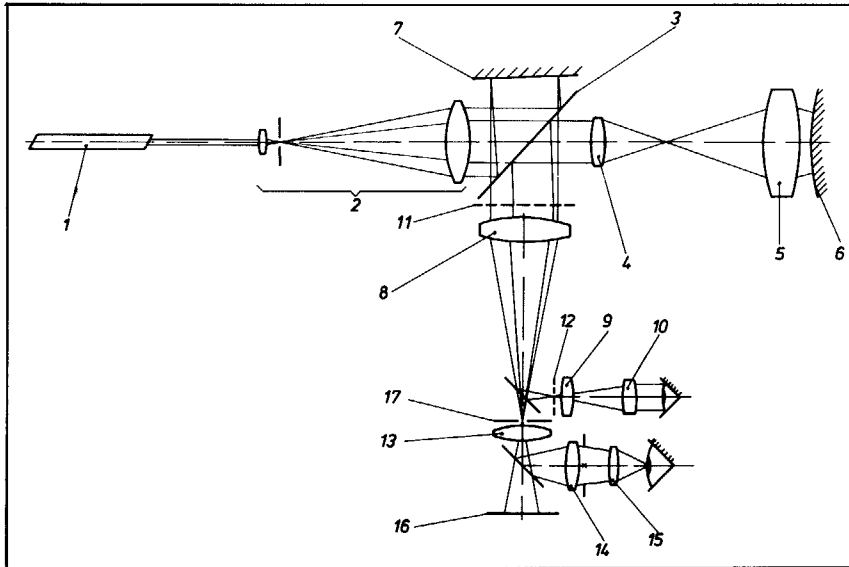
Voor de vervaardiging en beproeving van asferische elementen van een hoge precisie is de interferometrische beproevingstechniek van bijzondere betekenis. Het te keuren optische element wordt daarbij beproefd met een stralengang die of nauwkeurig overeen komt met het latere gebruik van het element, dan wel met een 'vervangende stralengang' die zo is opgezet, dat de restfouten van het optische element op gevoelige en gemakkelijke wijze gemeten kunnen worden. Daar het proefstuk meestal als onderdeel van een gekompliceerd optische systeem bedoeld is, waarin storingsbronnen kunnen ontstaan, is de tweede methode als de normale te beschouwen. Om storingsbronnen te vermijden, probeert men ook de 'vervangende stralengang' uit zo weinig optische elementen op te bouwen als maar enigszins mogelijk is. Om precies te kunnen evalueren en de restfouten gemakkelijk te kunnen meten, wenst men in principe een zg. 'nulpoeving'. Dat betekent, dat men bij de interferometrische vergelijking tussen het golffront, dat over het proefstuk gegaan is en het referentie-golffront een afwijking gelijk nul zou willen hebben, wanneer het proefstuk zijn juiste vorm heeft bereikt. Dan kan men in werkelijkheid de nog bestaande fouten aan het proefstuk als op een topografische landkaart aan de hand van de hoogtelijnen direct als 'bergen' en 'dalen' ten opzichte van een aangenomen nulniveau onderkennen en direct op het proefstuk aantekenen. Het is duidelijk, dat dit een groot voordeel is ten opzichte van andere be-

proevingsmethoden, bij welke de informatie gekodeerd beschikbaar is en eerst vertaald dient te worden in een vorm die geschikt is voor gebruik in de werkplaats.

Het bereiken van de 'nulpoeving' was intussen tot voor enkele jaren een zeer moeilijk probleem voor optische konstruktors. Men heeft daartoe meestal een gekompliceerd optisch hulpsysteem nodig, 'kompensatiesysteem' genaamd. Dit is duur en er kleven risico's aan (wanneer slechts één lensafstand niet exakt klopt, vervaardigt men een fout asferisch element en merkt dat eerst op wanneer het optische systeem waarvoor het proefstuk bedoeld is, gemonteerd en beproefd wordt!). Tegenwoordig beschikt men over door computers vervaardigde kromlijnige buigingsrasters - in de literatuur meestal met de naam synthetische hologrammen aangeduid - een uitstekend middel ter vereenvoudiging van de compensatie-optiek. Zulk een raster kan in de opbouw van de beproevingsinrichting als een asferische lens worden gebruikt, laat het toe om het aantal echte lenzen tot één, hoogstens twee te beperken en leidt aldus tot een vernuftige opbouw met betrekking tot kosten en risico. De figuren 11 en 12 laten de inrichting zien waaraan wij de voorkeur geven. Zij komt overeen met een interferometeropstelling volgens TWYMAN, waarvan een kromlijnig raster (hologram) in de waarnemingsstralengang ter compensatie is toegevoegd (variant van een voorstel van K. G. BIRCH en F. J. GREEN (10)). Het raster wordt in deze opstelling weliswaar ook door de vergelijkingsbundel doorstraald, maar men richt de vergelijkingspiegel dusdanig dat van de referentie-golf slechts de nul-rasterorde in werking treedt, die toch geen verandering ondervindt. In deze opstelling loont het ook het door de beproevingsstralengang en daarmee door het proefstuk gevormde puntvormige beeld te bekijken. Het geeft directe informatie betreffende de praktische uitwerking van de voorhanden zijnde restfouten van het proefstuk op de kwaliteit van de stralenvereniging (verstrooiingscirkel) bij het latere gebruik in het optische systeem. Fig. 12 toont een interferometeropstelling voor de serie-afname van lenzen.

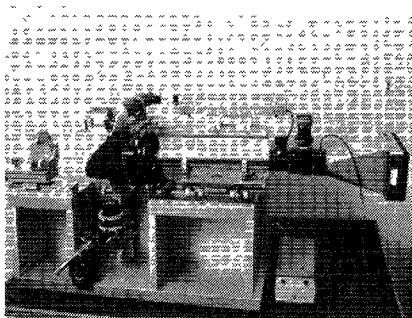
De concurrentiesituatie voor de asferische elementen

In de uiteenzettingen in het tweede hoofdstuk werd gepoogd te verduidelijken dat asferische elementen een ideaal middel vormen om het aantal systeemparameters te vergroten. Er bestaan pro-



Figuur 11 Interferometeropstelling voor de beproeving van asferische optische bouw-elementen. De compensatie-opstelling maakt zowel de beoordeling mogelijk van het asferische bouw-element met betrekking tot de golfvrontafwijking alsook die van de kwaliteit van de stralenbundeling.

1 laser, 2 spreidingsoptiek, 3 halfdoorlaatbare spiegel, 4 hulplens, 5 te beproeven produkt, 6 autokollimatorspiegel, 7 referentiespiegel, 8, 9, 10 kijker voor puntvormig beeld, 11 raster, 12 dradenkruis voor justering en meting van de grootte van de verstrooiingscirkel, 8, 13, 14, 15 afleesinrichting voor het interferometerbeeld, 16 filmvlak, 17 diafragma.



Figuur 12 Interferometeropstelling voor de seriebeproeving van lenzen. De getallen hebben dezelfde betekenis als in fig. 11.

blemen waarbij asferische elementen het enige bruikbare alternatief vormen. Dat geldt bijv. voor alle gevallen waarin lenzen wegens chromatische fouten of door onvoldoende doorlaatbaarheid voor stralen niet kunnen worden toegepast (astronomische telescopen, spectraalapparatuur voor het infrarood gebied of zeer kortgolvlige straling). In veruit de meeste gevallen konkurreert het asferische element met andere oplossingen. Bezien wij bijv. de ontwikkeling van een fotografisch objektief met hoog prestatievermogen: Hier kan men een deel van de parameters, die voor de oplossing van het probleem nodig zijn, door het invoeren van asferische vlakken aandragen en zo doende ten opzichte van de oplossing met sferische vlakken met minder lenzen toekomen. Daardoor

wordt het systeem in het algemeen kleiner, dus handelbaarder, en er wordt bespaard op de kosten van de niet benodigde lenzen, hun vattingen, alsook van montage en justering. Aan de andere kant staan de meerkosten van de asferische vlakken. Zij worden veroorzaakt door de dure speciaal machines en de wezenlijk langere productie- en beproevingstijden. Daarom valt de beslissing omtrent toepassing van asferische vlakken bij dergelijke problemen alleen op grond van de 'balans' - wij schrijven dit tussen aanhalingstekens omdat ook zulke zaken als verbeterde hanteerbaarheid door vermindering van grootte en gewicht mede worden ingekalkuleerd - ten gunste van de sferische of asferische oplossing uit. Daarom concentreren zich de inspanningen tegenwoordig daarop, om de produktiekosten van asferische elementen steeds verder omlaag te brengen. Van de mate waarin dit gelukt zal het afhangen hoe het toepassingsgebied van asferische elementen zich verder uitbreidt.

Kopieertechnieken

Bij de inspanningen voor het omlaag brengen van de produktiekosten spelen kopieertechnieken een belangrijke rol. Asferische elementen met een matige nauwkeurigheid worden reeds lang met succes volgens een persprocédé vervaardigd: hier wordt het nauwkeurige

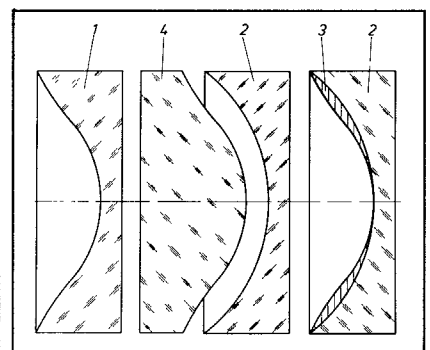
'negatief' van het gewenste asferische element op een stempel (meestal uit staal) aangebracht. Dit stempel en dat voor de andere zijde worden in een opstelling op een hete deegachtige glasklomp gedrukt, waardoor zo de gewenste vorm ontstaat.

Asferische vormen van middelbare en bij kleine stukken van hoge nauwkeurigheid kunnen tegenwoordig uit kunststof door middel van een spuitgietprocédé vervaardigd worden. Hier wordt in de holle ruimte, gevormd door beide vormstempels de vloeibare kunststarmassa onder hoge druk ingespoten.

Voor brilleglazen uit kunststof wordt met succes een gietprocédé toegepast. Waarbij het spuitgieten kunststoffen worden toegepast die door temperatuur en druk vloeibaar worden gemaakt, worden hier kunststoffen toegepast die eerst bij kamertemperatuur nog vloeibaar zijn en na het ingieten in de vorm pas door het chemische proces van de polymerisatie vast worden.

Voor asferische optische elementen met hoge precisie heeft het aanbrengen van een dunne huid uit kunststof op daartoe geschikte dragers zijn waarde bewezen. Het principe van dit procédé is uit de literatuur reeds lang bekend (11), maar er moesten aanzienlijke technologische moeilijkheden worden overwonnen om tot de tegenwoordige seriegrootte te geraken.

Figuur 13 toont het grondbeginsel. In



Figuur 13 Principe van het gietkopieerprocédé met dunne epoxiharslamellen. Het te vervaardigen optische element 1 in een als drager aangeduid element met sferische grensvlakken (2) en een dunne lamel 3 uit epoxihars. De lamel ontstaat door afgieten tegen een matrijs 4.

het linker figuurbeeld wordt het te vervaardigen optische element met asferische vlakken getoond. Het wordt gesplitst in een als drager aangeduid element met sferische grensvlakken en een dunne lamel uit epoxihars. Het asferische buitenvlak daarvan wordt tegen een matrijs afgegoten. De matrijs kan vele malen worden gebruikt. De produktie-

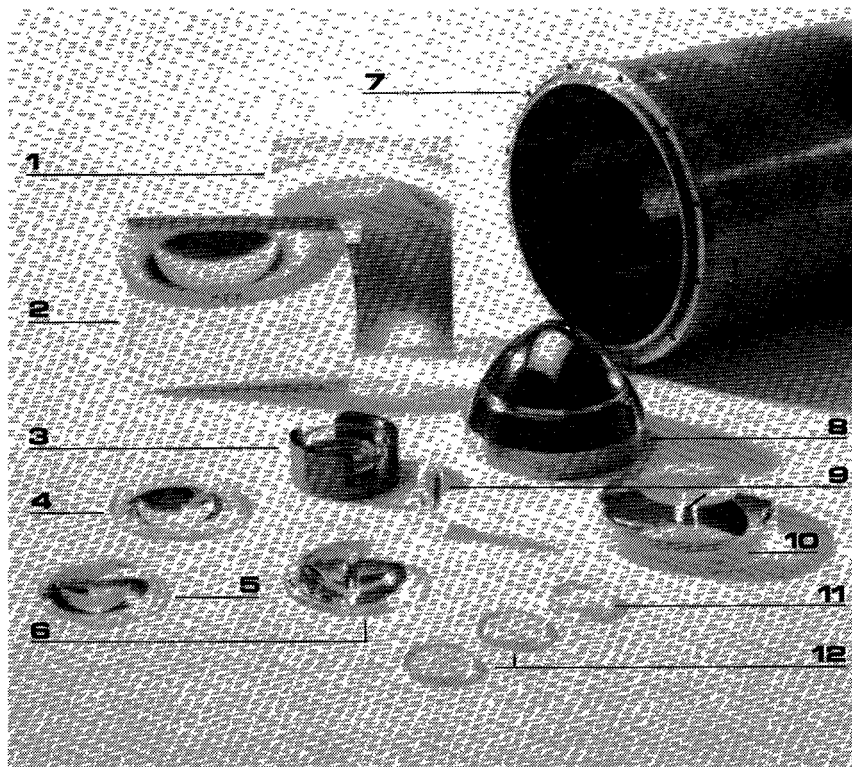
kosten daarvan verschijnen daardoor als een klein onderdeel van de prijs van een asferische lens. De kosten van de gereedschappen voor het afgieten en het afgietproces zelf kunnen bij seriefabrikage op vergelijkbare wijze laag worden gehouden. Met dit procédé is het ons gelukt een doorbraak te bewerkstelligen voor het gebruik van asferische lenzen in foto-objektieven voor amateurdoeleinden.

Werkvoorbeelden

Des te moeilijker het optische probleem, des te groter zijn de kansen voor de toepassing van asferische bouwelementen. Even veelzijdig zijn de gevallen die in de praktijk tot uitvoering komen. In figuur 14 voeren wij ter illustratie een kleine selectie van asferische elementen ten tonele die in de laatste tijd door de firma Zeiss, Oberkochen, gefabriceerd werden. Getoond wordt dat asferische elementen reeds in praktisch alle vakgebieden van de optiek toegepast worden.

Literatuur

[1] R. Descartes: La Dioptrique, Paris 1638
 [2] Chr. Huygens Traité de la lumière.
 [3] E. Abbe DRP 119915 (1899)
 [4] K. Schwarzschild Abh. d. kgl. Ges. d. Wiss. z. Göttingen, 1905/06
 [5] H. Chrétien: Rev. d'Optique 1,13,49(1922)
 [6] Chr. Wren: Phil. Trans. 4,1059, (1669)
 [7] F. Twyman: Prism and lens making, Hilger Watts, Ltd., 1952
 [8] A. Cox, M.F. Royston. Proc. Conf. on Optical Instr. 1961, Chapman & Hall Ltd., London 1952, 330.
 [9] E. Heynacher Optik 45, 249, (1976)
 [10] K.G. Birch, F.J. Green: J. Phys. D5, 1982 (1972)
 [11] H. Rinia, P.M. van Alphen: Philips Tech. Rdsch. 2,349 (1947)
 [12] D. Reinhardt: Zeiss-Inf. 23,62 (1977/78) Heft 87
 [13] E. Glatzel: Zeiss-Inf. 22,45(1976) Heft 85 en 23,24 (1977/78) Heft 86.



Figuur 14 Voorbeelden van asferische bouwelementen uit de productie van Zeiss

- 1. Elliptische vangspiegel voor een meetinstrument.
- 2. Kollimatorspiegel (buitenaxiale paraboloïde) voor een infrarood spektraalfotometer.
- 3. Justeerinrichting voor de vervaardiging van asferische lenzen volgens het gietkoperprocédé.
- 4, 5. Lenzen voor het bekijken en fotograferen van de oogachtergrond.
- 4. Objektieflens van de funduskamera 5. Ophthalmoskopeerlens.
- 6. Kleine fokuseerlens met middenboring voor een laser kernfusieexperiment (Max Planck Instituut) voor Plasmafysika te Garching.
- 7. Bouwelementen van een kleine paraboloïdespiegel voor Röntgenstraling (12), vervaardigd voor het Max Planck Instituut voor buitenaardse fysika te Garching.
- 8. Metaalmatrijs voor een paraboloïde met grote openingsverhouding.
- 9. Optiek voor de beveiliging van golfpijpen tegen beschadiging door lichtontladingen (voor Vereniging voor Onderzoek aan Zware Ionen te Darmstadt).
- 10. Matrijs voor de vervaardiging van de asferische lenzen van de verrekijkerloop voor staarpatiënten.
- 11. Lens voor Distagon 1 : 1,4 f = 35 mm (13).
- 12. 2 lenzen voor een verrekijker met beeldversterker voor nachtwoarneming.