

Asferica II

Het maken, beproeven en toepassen van zeer nauwkeurige, asferische optische elementen

Dr. Ir. J. Haisma,

W. Mesman,

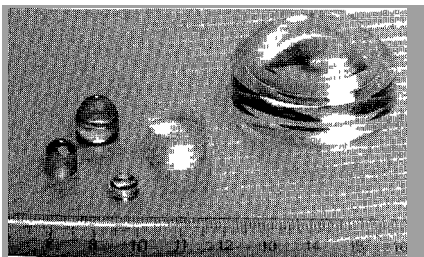
J. M. Oomen,

J. C. Wijn, medewerkers van het Philips Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

Asferische oppervlakken in optische stelsels bieden verbetering van de beeldcorrectie, vergroting van de numerieke apertuur, alsmede vermindering van het vereiste aantal brekende oppervlakken. De ontwerparbeid omvat het berekenen van aplanatische stelsels (N.A. 0,4 en hoger, veld diameter 100–500 μm) en het ontwerpen voor minimale golffrontafwijkingen bij groot veld (fotografische objectieven). Bi-asferische objectieven zijn berekend voor de uitlezing bij LaserVision en Compact Disc, alsmede voor de inlezing bij de zogenaamde Master-platen van de beide systemen; verder zijn ontworpen een asferisch stelsel voor projectietelevisie en een zoomlens. De fabricage geschiedt "optomechanisch", door draaien en (glad)slijpen op de COLATH. De gemaakte optische elementen zijn van "buigingsbegrensd" kwaliteit. De beschrijving van de fabricage behelst bewerkingskwaliteit en afbeeldingsfouten, het aligneren der brekende oppervlakken, alsmede kwaliteitsbewaking (bewerkingscontrole en acceptatietest). Vormnauwkeurigheden van 0,2 μm en ruwheidswaarden van minder dan 5 nm (standaarddeviatie) zijn voor kleine oppervlakken bereikt. Kwaliteitsvermindering door draai- en slijpsporen is verwaarloosbaar. Als meetmethoden zijn interferometrie (Twyman en Green), verstrooiingsmetingen, tastermetingen en de bepaling van de ruimtelijke frequentieresponsie (MTF) gebruikt.

Proeffabricages met de COLATH

Figuur 1 toont een vijftal lenzen die met de COLATH zijn vervaardigd. Vier ervan zijn bi-asferen, waarvoor nogal verschillende materialen zijn gebruikt, zoals een speciaal glas met hoge brekingsindex, kwartsglas en een transparante kunststof. De numerieke apertuur van twee van de lenzen is bijzonder groot (0,85). De vijfde lens, rechts op de foto, is een platbolle (zuiver sferische) lens. Deze is destijds, als één van de eerste producten, op de COLATH met een diamantbeitel uit een kunststof (polymethylmethacrylaat) gedraaid, hoofdzakelijk om de met de numeriek bestuurd draaibank bereikbare bewerkingskwaliteit (de resterende vormnauwkeurigheid en oppervlakterutheid) in de praktijk vast te stellen (1).



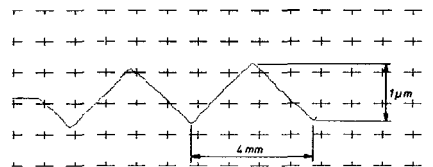
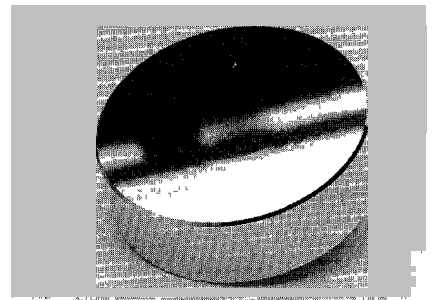
Figuur 1 Vijf voorbeelden van optomechanische proeffabricage, uitgevoerd op de COLATH

LATH Lens 1: bi-asfeer, bedoeld als inleeslens voor zg. Master-platen. Het materiaal is glas (SF 59, met $n = 2,00097$ bij $\lambda = 0,458 \mu\text{m}$). De numerieke apertuur bedraagt 0,85. Lens 2: bi-asfeer, voor hetzelfde doel; numerieke apertuur idem. Het materiaal is kwartsglas (met $n = 1,4650$ bij $\lambda = 0,458 \mu\text{m}$). De veel kleinere brekingsindex, vergeleken met die bij lens 1, gaat samen met een opvallend sterkere kromming van het bovenoppervlak. Lens 3: bi-asfeer, bedoeld als uitleeslens voor optische platen (vgl. fig. 1b). Het materiaal is de kunststof PMMA (polymethylmethacrylaat, met $n = 1,4908$ bij $\lambda = 0,633 \mu\text{m}$). De numerieke apertuur bedraagt 0,43. Lens 4: bi-asfeer, materiaal kwartsglas, numerieke apertuur 0,11. Deze lens vormt een onderdeel van een holografische interferometer (die gebruikt gaat worden bij het controleren van de vormnauwkeurigheid van asferische mallen). Lens 5: zuiver sferische, platbolle lens. Het materiaal is PMMA. Deze lens is destijds als één van de eerste optische elementen op de COLATH gedraaid (met een diamantbeitel).

Figuur 2 geeft nog een voorbeeld van de vele mogelijkheden die de COLATH biedt voor het draaien van ingewikkelde en toch uiterst nauwkeurige profielen. In het bovenvlak van het gekozen koperen werkstuk is een golfvormig patroon van uiterst "platte" driehoeken gedraaid. De driehoeken bezitten een pijlhoogte van slechts 1 μm , bij een basislengte van 4 mm (waardoor hun tophoek op ongeveer drie boogminuten na gelijk aan 180 graden is). De opstaande zijden vertonen

afwijkingen (hakkels) die kleiner dan ca. 0,05 μm zijn, wat uit metingen van het profiel volgt (fig. 2b). Aan de beitel voor dergelijk nauwkeurig werk dienen natuurlijk ook de hoogste eisen te worden gesteld. In het afgebeelde geval was de beitel een rondgeslepen diamantpunt met een afwijking van minder dan 0,1 μm ten opzichte van een zuiver cirkelvormige snijkant (straal 1 mm). De grenswaarde 0,1 μm geldt over de totale afwikkelhoek.

Inmiddels is met de COLATH veel ervaring opgedaan, daaruit is inzicht ontstaan dat het draaien bereikbare vormprecisie zijn grens vindt in de afrondingsfouten van het numerieke besturingssysteem en in de zeer bewust opgelegde beperking tot gebroken rechte lijnen, als lineaire benadering van de gevraagde contouren (Deze benadering kan wel zeer nauwkeurig gebeuren, zelfs binnen een zg. tolerantieband met een breedte van slechts 0,01 μm). Principeel betere benaderingen dan het gebruikte lineaire interpoleren zijn mogelijk, daarvoor wordt de besturing thans aangepast. Mechanische beperkingen, zoals onvolkomenheden in de lagers, traagheid van servomotoren en regelkleppen, blijken in de huidige situatie weinig bij te dragen tot de nog optredende afwijkingen in de gemaakte producten.



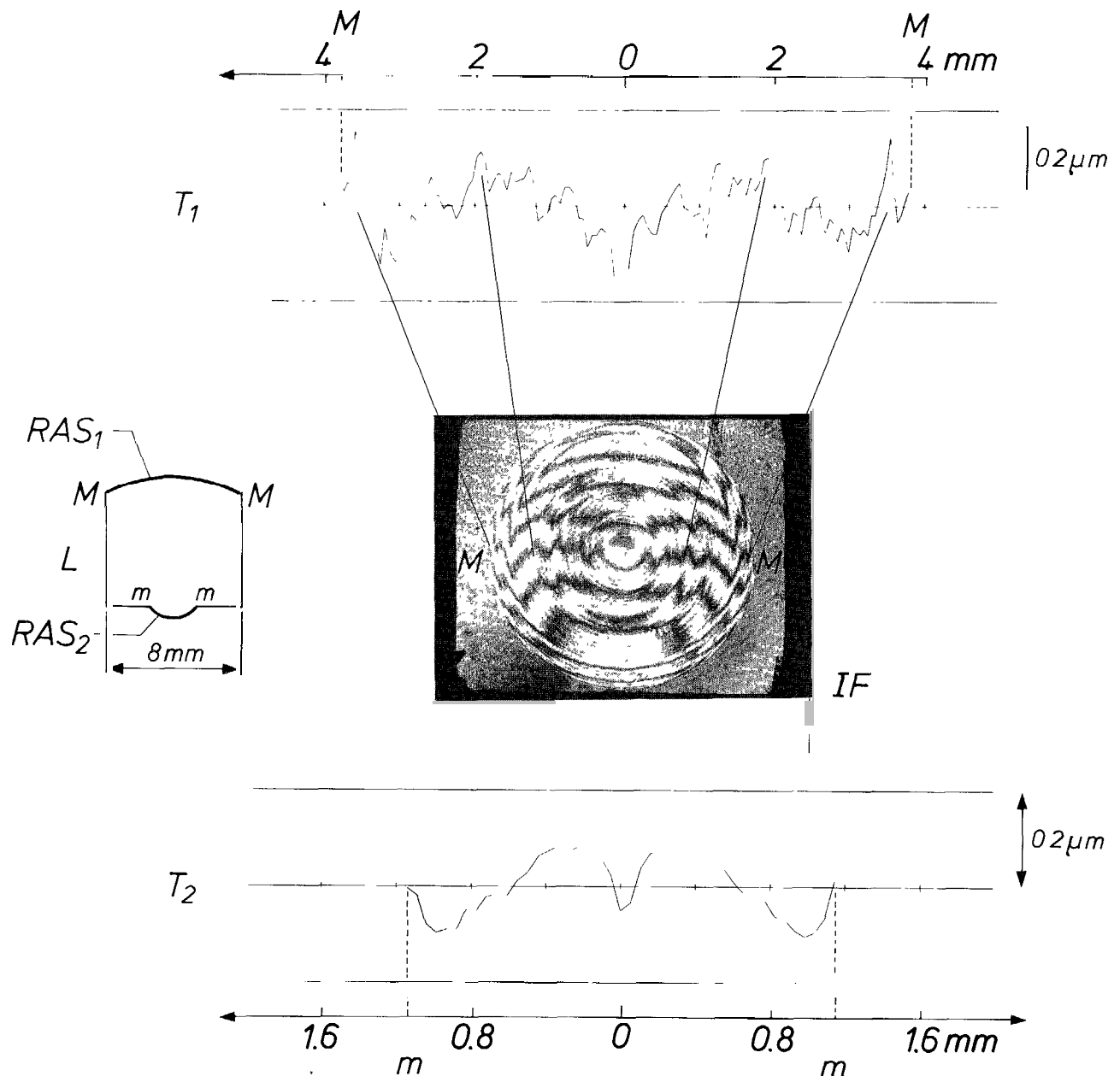
Figuur 2 a) Koperen werkstuk (diameter 80 mm, hoogte 30 mm), gedraaid op de COLATH. Het bovenvlak is daarbij uiterst nauwkeurig geprofileerd. In radiale doorsnede bestaat het profiel uit een rij op elkaar volgende driehoeken welke pijlhoogte en basislengte resp. 1 μm en 4 mm zijn. b) Een in radiale richting opgenomen tasterdiagram. Er blijkt uit dat de resterende hakkels op de zijden van de driehoeken kleiner dan ongeveer 30 nm zijn.

Een drietal controlemetingen van de bereikte oppervlaktekwaliteit bij een bi-asfeer is in figuur 3 afgebeeld. Het aardige van deze controle is vooral dat er twee meetseries, de ene langs mechanische weg met een taster verkregen en de andere volgens een optische interferentiemethode, beschikbaar zijn. Bij vergelijking ziet men dat de deviaties van het grote asferische oppervlak gemeten met de taster goed corresponderen met afwijkingen in het (rechtlijnige) verloop van de interferentiestrepen.

Het kleine asferische oppervlak is eveneens met de taster onderzocht, wat de derde meetserie (T_2 in figuur 3) heeft opgeleverd. Van deze meetserie is weinig terug te vinden in het interferogram; de betrekkelijke vlakheid van de desbetreffende contour zal daarvoor wel verantwoordelijk zijn. Het verloop van de registraties met de taster langs een volledige contour geeft een indruk van de met de COLATH bereikbare vormprecisie. De meetresultaten leren dat maximale vormafwijkin-

gen van $0,2\mu\text{m}$ of zelfs nog minder realistisch mogen worden geacht. Op het speciale karakter van de bi-asfeer uit figuur 3 zal aan het eind van het artikel nog worden teruggekomen.

Bewerkingskwaliteit en beeldfouten
Hoe goed een gemaakte spiegel of lens nu precies is, wordt logischerwijze bepaald door slechts twee factoren. ontwerp en uitvoering. De invloed van het gekozen ontwerp en de details daarvan op beeldfouten komen hier niet aan de



Figuur 3 Drie controlemetingen van een als proef op de COLATH gedraaide bi-asferische lens (L, getekend in overlangse doorsnede; men zie ook figuur 1, lens no. 1) met numerieke apertuur 0,85 IF interferogram van de lens. De afwijkingen in de rechte lijnen worden hoofdzakelijk bepaald door het grote asferische oppervlak (RAS_1) T_1 tasterdiagram, opgenomen ongeveer langs de "middellijn" M-M van RAS_1 . Tussen deze beide metingen bestaat een goede correspondentie. T_2 tasterdiagram langs de lijn m-m van het ondervlak van de lens, het kleine asferische oppervlak (RAS_2). De maat van het aangegeven tolerantiegebied ($0,2\mu\text{m}$) helpt een indruk te verschaffen van de resterende afwijkingen in de vorm, zowel bij RAS_1 , als bij RAS_2 . Voor details van de gebruikte meetmethodes zie men het hoofdstuk "Kwaliteitsbewaking".

orde – waarbij wij ervan mogen uitgaan dat het rekenwerk volledige en voldoende nauwkeurige fabricagespecificaties kan opleveren.

Bij de uitvoering, die vanzelfsprekend zorgvuldig aan de hand van de specificaties geschiedt, blijkt dat in de te maken oppervlakken drie soorten afwijkingen optreden, die de afbeelding kunnen storen. De eerste is de zg. langzame vormfout. (Deze fout wordt in de wandeling als "de" vormfout geclassificeerd). De geproduceerde vorm of contour stemt dan niet overeen met de gespecificeerde vorm, althans gerekend over (relatief) lange afstand.

De tweede soort afwijkingen noemt men "snelle vormfouten". Dit zijn vormfouten, met een ruisachtig karakter, die de ruwheid van het oppervlak betreffen en die over relatief korte afstanden variërende afwijkingen van de gespecificeerde vorm voorstellen. De oppervlaktegesteldheid is dan plaatselijk te ruw, wat het passerende licht deels verstrooit. De afbeelding zal als gevolg daarvan op zijn minst aan lichtsterkte verliezen.

De derde soort, misschien nog het beste "zuiver periodieke vormfout" genoemd, bestaat uit een schroeflijnachtig, zeer ondiep spoor over het gehele bewerkte oppervlak. Het draaien met een beitel, en trouwens eveneens – zij het in (veel) mindere mate – de bewerking met de slijptol, leidt tot deze vormafwijking. Ook hier is het voornaamste gevolg verlies aan lichtsterkte, veroorzaakt door verstrooiing. (Bij de COLATH is men er al snel in geslaagd de diepte van het draaispoor op de werkstukken, dat een spoed van 5 à 10 μm heeft, tot ongeveer 20 nm te reduceren.) Beeldfouten komen, in overeenstemming met de drie soorten vormfouten, in het algemeen op drie verschillende manieren tot stand. Een beschrijving hiervan is te vinden in het Philips Technisch Tijdschrift 41, no 10.

Het opspannen en uitrichten

Bij de vervaardiging van een asferische lens op de COLATH werkt men b.v. het voorste lensoppervlak in zijn geheel eerst af en daarna pas het achterste. Dit vereist een nauwkeurige omkering en uitrichting van de lens ten opzichte van de hoofdspil van de draaibank, tussen de genoemde bewerkingsoperaties in. Elk van de beide brekende oppervlakken heeft zijn eigen optische as. Wil de lens later bevredigend kunnen functioneren, dan moeten die twee optische assen goed gealigneerd worden. Door grote zorgvuldigheid bij het op- en opspannen van de lens kan worden bereikt dat de beide optische assen zich op minder dan 1 μm afstand van de hoof-

spilas bevinden, terwijl het voorvlak van de lens minder dan 0,2 mrad scheef staat. De optische ontwerper moet zich hier richten naar een eis van de mechanische kant. Zijn ontwerp moet voorzien in voldoende opspanlengte, b.v. 3 mm bij lenzen waarvan de dikte (en ook de diameter) ongeveer 8 mm is, langs de zijkant van de lens.

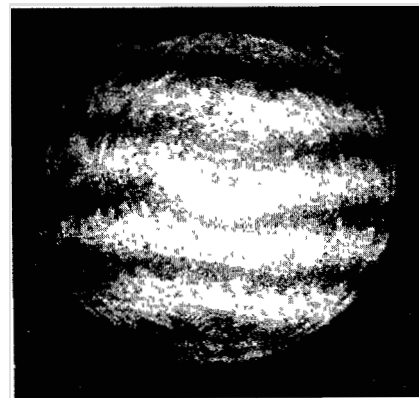
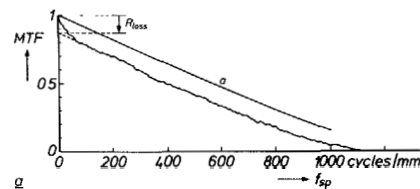
Kwaliteitsbewaking

De vervaardiging van de asferische lenzen en spiegels loopt parallel met tweeërlei controlemetingen. Om te beginnen wordt tijdens de fabricage regelmatig onderzocht of er bewerkingsfouten optreden, die een ingrijpen nodig maken. Op de COLATH is een klein handbedieningspaneel aanwezig, zodat de technicus dergelijke correcties met rechtstreeks zicht op het werk zelf kan uitvoeren. Na afloop van de fabricage wordt een acceptatietest uitgevoerd, een soort functionele controle om na te gaan of de gemaakte component naar wens zal kunnen functioneren. Deze tweede soort controlemetingen stelt men dikwijls uit totdat van een aantal optische elementen een geheel is samengesteld. Qua optische eigenschappen moet dit geheel in het betrokken systeem bij voorkeur een eenvoudig controleerbare functie vervullen. Om de uiterste nauwkeurigheid te behalen, is niet zelden een reeks operaties van maken, controleren, overmaken, opnieuw controleren, enz. nodig.

De acceptatietest

De beoordeling of b.v. een gereedgekomen asferisch lenzenstelsel de voorziene prestaties inderdaad zal kunnen leveren, steunt kwantitatief nog het beste op uitgebreide kennis van het scheidend vermogen. Daarom meten wij om te beginnen de ruimtelijke frequentieresponsie [1] van het stelsel. Er wordt dan bepaald in hoeverre het stelsel verlies aan modulatie diepte veroorzaakt, afhankelijk van de ruimtelijke frequenties die in een af te beelden testplaatje aanwezig zijn (figuur 4a). Leidt de afbeelding tot een foto – een röntgenfoto is een goed voorbeeld – dan komt de verminderde modulatie diepte tot uitdrukking in contrastverlies. Deze verliezen hangen dus ook af van de ruimtelijke frequentie. Dit type functionele controle maakt het mogelijk snel te zien in hoeverre het gemaakte stelsel anders zal functioneren dan een volkomen foutloze uitvoering. De controle geeft in deze vorm echter nauwelijks uitsluitsel waar in het stelsel een eventuele fout precies gelokaliseerd moet worden. Een andere functionele test, die wat meer overeenkomst heeft met het gebruik van een gemaakt stelsel en die

ovendien veel gemakkelijker toelaat de plaats van ontstaan van een beeldfout te vinden, is het maken van een interferogram, met behulp van een interferometer volgens Twyman en Green (figuur 4b) [2]. In de "ideale" situatie bestaat het interferogram uit een aantal rechte, evenwijdige strepen. Plaatselijke afwijkingen in de optische weglengte uit zich als deviaties in evenwijdigheid en rechtehooftheid, op de corresponderende plaats in het interferogram. Speciaal ten aanzien van de langzame vormfouten is de gevoeligheid van deze interferometrische controle groot; afwijkingen ter grootte van enige procenten van de gemiddelde golflengte van het zichtbare deel van het spectrum zijn constateerbaar.

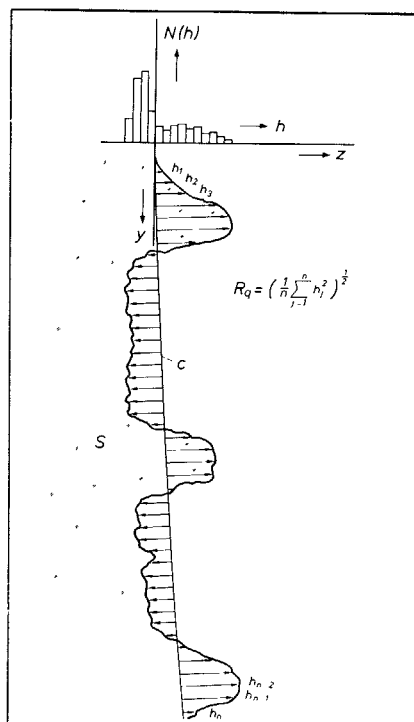


Figuur 4 De acceptatietest van een gereedgekomen asferisch lenzenstelsel omvat de bepaling van zijn ruimtelijke frequentieresponsie (modulatie-overdracht MTF) en het maken van een Twyman-Green-interferogram. a) Voorbeeld van een meting van MTF als functie van de ruimtelijke frequentie (in perioden/mm; één periode correspondeert met één lijnenpaar – "cycle" – op een testplaatje). De gecontroleerde bi-asferische lens, met N.A. gelijk aan 0,40, was niet ontspiegeld, het optredende reflectieverlies (R_{loss}) heeft de experimentele curve doen verschuiven naar waarden die ongeveer 0,15 lager liggen dan de theoretisch maximale waarden (curve a). De kwaliteit van de betrokken lens kan op grond van deze meting als "buigingsbegrensd" worden geaccepteerd. b) Een Twyman-Green-interferogram gemaakt voor dezelfde lens. Het verloop van de donkere strepen wijst op afwijkingen in de optische weglengten die kleiner moeten zijn dan ca. 0,1 μm , wat in overeenstemming is met de onder (a) vermelde kwalificatie van de lens. De in het interferogram zichtbare concentrische ringen houden verband met het bewerkingsproces en de oppervlaktekwaliteit; samenhang met de (langzame) vormfout is er niet

Bewerkingscontrole

Zoals gezegd, is het bij de bewerking nodig om op drie soorten fouten nauwkeurig acht te slaan: contourfouten, ruwheid van het oppervlak, storende sporen van het draaien. De eerste soort fouten, de afwijkingen van de verlangde vorm van b.v. een lensoppervlak, bepalen wij met uiterst gevoelige mechanische tasters [3]. Het gebruikte instrument, waarmee langs optische weg differentieel gemeten wordt, heeft in zijn reproduceerbaarheid en standaarddeviatie van nog geen 5 nm, ondanks de toepassing van mechanische tasters. De absolute onnauwkeurigheid van het instrument is ongeveer $0,1 \mu\text{m}$. Deze mate van vormnauwkeurigheid is voor asferische elementen geen overdreven luxe; het goed functioneren van de gemaakte lenzenstelsels b.v. hangt er inderdaad ten nauwste mee samen. De met de bewerkingen verkregen "optische gladheid" kan worden gecontroleerd door de resterende oppervlakteruwheid te berekenen uit metingen van lichtverstrooiing aan het desbetreffende oppervlak [4]. De lichtverstrooiingsmetingen zijn in principe ook bruikbaar om vast te stellen hoe diep de groeven veroorzaakt door het draaien of slijpen zijn (de periodieke vormfout). De in ons laboratorium voor dergelijke metingen ontwikkelde methode [5] is in het bijzonder geschikt bij oppervlakken met een sterke kromming (kromtestralen van 50 tot 1 mm), die in asferische lenzenstelsels nogal eens voorkomen. De op deze wijze vindbare amplitude van de oppervlakteruwheid kan een fractie van 1 nm tot enige tientallen nm bedragen.

De controle bestaat uit het meten van hoekverdelingen van monochromatisch licht dat verstrooid is door bestraalde stukjes van het bewerkte oppervlak. De intensiteit van het verstrooid licht vertoont samenhang met de "amplitude" van de ruwheid, terwijl de richting, de verstrooiingshoek dus, gegevens verschaft over de ruimtelijke frequentie die karakteristiek is voor een bepaalde storing (ruwheid) in het oppervlak. Evenals bij de golffrontfouten, pleegt men de amplitude van de ruwheden door middel van standaarddeviaties in getalvorm vast te leggen. Voor de definitie van de standaarddeviatie wordt in principe uitgegaan van een contour van het "werkelijke" oppervlak en een op dezelfde plaats gekozen vloeiend verloopende, "gemiddelde" contour (figuur 5). De waarden voor de standaarddeviaties gelden alleen binnen een bepaalde band van ruimtelijke frequenties. De grenzen van die frequentie zijn karakteristiek voor de gevolgde (optische) meetmethode, en niet zozeer voor het desbetreffende oppervlak. (Door de keuze van meetmethode legt men een "functionerende filtering" vast van de aanwezige structuurpatronen in het oppervlak [6]).

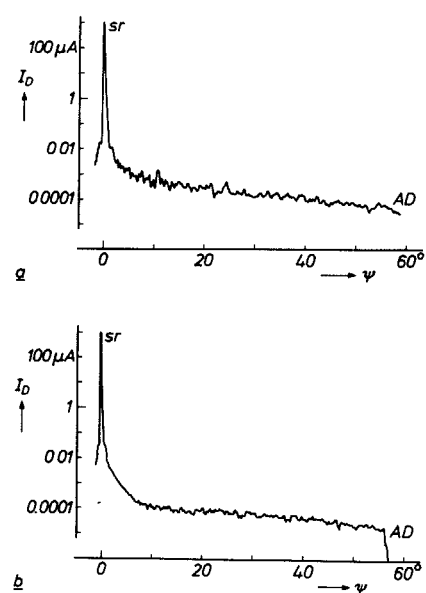


Figuur 5 De definitie van oppervlakteruwheid door middel van een standaarddeviatie R_q . Het oppervlak van een optisch element S zou bij volmaakte gladheid de (ideale) contour C (y, z) volgen. De nog aanwezige haken kunnen lichtverstrooiing veroorzaken, een verschijnsel dat men kan gebruiken om er een R_q -waarde van het desbetreffende oppervlak uit te berekenen. Het afgebeelde histogram $N(h)$ is een benadering van de zogeheten amplitudedichtheidsfunctie van het oppervlak. Uit die functie kan men ook statistische grootheden die kenmerkend zijn voor de topografie van een bewerkte oppervlak afleiden [6].

Bij de verstrooiingsmetingen bleek het uitrichten van een te onderzoeken oppervlak weer een moeilijk aligneringsprobleem te vormen. Men heeft het langs optische weg kunnen oplossen, dus zonder het desbetreffende oppervlak te moeten aanraken [5]. Figuur 6 toont twee voorbeelden van gemeten hoekverdelingen van licht verstrooid door een op de COLATH bewerkte oppervlak van kwartsglas. De uit deze metingen berekende oppervlakteruwheid kan worden gekarakteriseerd door middel van twee standaarddeviaties ($R_q^{(1)}$ en $R_q^{(2)}$, tabel I). De nog resterende ruwheid van het (geslepen) oppervlak bevat zowel een eendimensionaal toevalspatroon van ruwheden – samenhangend met de richting van het slijpen – als een tweedimensionaal patroon. Bij een controle evenwijdig met de richting van slijpen manifesteert het eendimensionale ruwheidspatroon zich niet, en dus wordt de hoekverdeling

van het verstrooid licht dan alleen door het tweedimensionale patroon veroorzaakt.

Het hele hoekverdelingsspectrum in figuur 6 vormt een soort "ondergrond", met volkomen reproduceerbare haken (de zogeheten "speckles" in de lichtverdeling). Op die ondergrond gesuperponeerd is de piek van de gespiegelde straal, bij verstrooiingshoek nul (per definitie). Het "gewoon" gespiegelde licht is derhalve bij de uitvoering van de controlemeting slechts een verstoring. Van alle ruimtelijke frequenties die aanwezig zijn in de ruwheidspatronen bepaalt alleen een deel het meetresultaat.



Figuur 6 Optische controle van een na gladlijpen resterende oppervlakteruwheid bij een element van kwartsglas bewerkte op de COLATH. De beide curven zijn hoekverdelingsspectra (AD) van monochromatisch licht dat door het desbetreffende (holle) oppervlak is verstrooid. De intensiteit van het verstrooid licht, gemeten met een fotodiode en uitgedrukt als de fotostroom I_D , is uitgezet tegen de verstrooiingshoek ψ (die gerekend is ten opzichte van de richting van de "gewoon" gereflecteerde lichtbundel, de afgebeelde piek sr). De haken in beide spectra zijn volkomen reproduceerbaar (de zogeheten "speckles" in de lichtverdeling, geen ruis dus). a) Deze meting is uitgevoerd in de richting loodrecht op die van het slijpen. Aan het spectrum liggen twee toevalspatronen van ruwheden ten grondslag, een eendimensionaal en een tweedimensionaal patroon. b) Deze meting, die evenwijdig aan de richting van het slijpen is uitgevoerd, heeft een spectrum van geringere intensiteit dan (a) opgeleverd, aangezien het eendimensionale toevalspatroon bij deze meetrichting niet tot verstrooiing kan bijdragen. Voor de uit de metingen (a) en (b) berekende standaarddeviaties $R_q^{(1)}$ en $R_q^{(2)}$, zie tabel I.

De kleinste van dat werkzame deel hangt samen met de kleinste verstrooiingshoek die nog verstrooid licht oplevert zonder verstoring door gespiegeld licht; de grootste veroorzaakt verstrooid licht dat precies langs het te

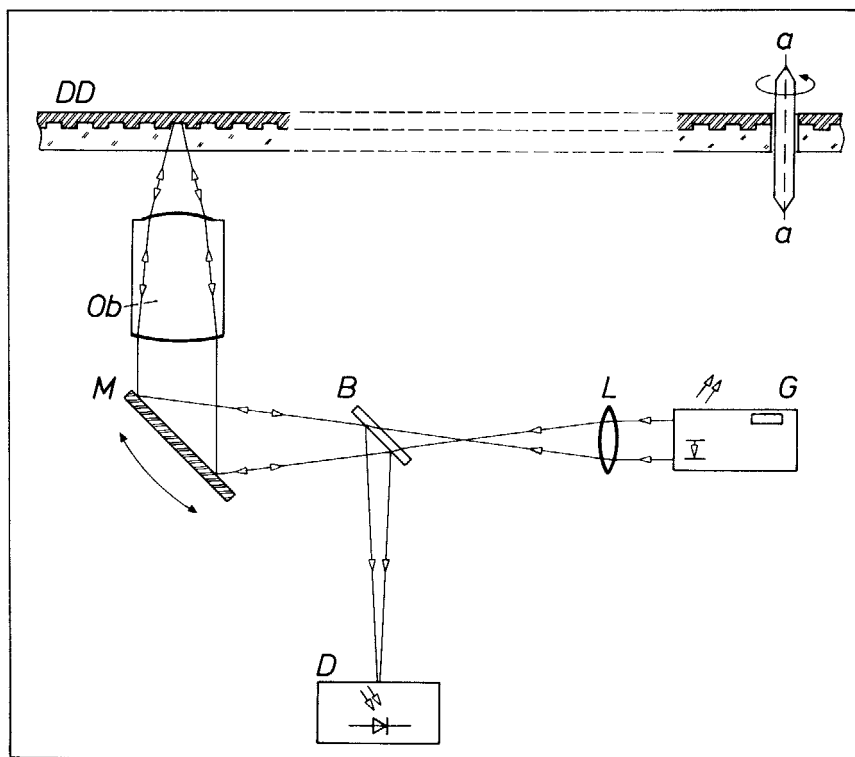
controleren oppervlak scheert. In de gedane controlemetingen was de grootste ruimtelijke frequentie 10^6 m^{-1} , de kleinste ca. $1,7 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ (overeenkomend met "golfengten" van resp. $1 \mu\text{m}$ en $60 \mu\text{m}$).

materiaal	oppervlak	ruwheid (nm)		bewerking
		$R_q(1)$	$R_q(2)$	
kwartsglas	hol, sferisch $r = 10,0$	0,5	1,4	gladslippen op CO-LATH figuur 15 a, b
kwartsglas	hol, sferisch $r = 7,0$	0 [b]	1,6	kompolijsten á]
staal	hol, asferisch $r \approx 6,7$	4,4	4,4	gladslippen op CO-LATH
koper	hol, sferisch $r = 6,7$	n d	4,4	gedraaid met diamantbeitel op CO-LATH

á] met de hand uitgevoerd

b] bij kompolijsten ontstaat geen eendimensionaal patroon

Tabel 1 Resultaten van lichtverstrooiingsmetingen (een voorbeeld staat in figuur 6) uitgevoerd ter bepaling van de resterende ruwheid op een aantal materiaaloppervlakken die verkregen zijn door gladslippen of draaien. De daarvoor bestaande spectrometer [5] geeft de mogelijkheid de grootheden $R_q(1)$ en $R_q(2)$ te bepalen, beide standaarddeviaties van (uiterst) kleine toevallige vormverstoringen (gerekend ten opzichte van een vloeiend verloopend "gemiddeld" oppervlak, zie figuur 5), de eerste karakteriseert een eventueel aanwezig eendimensionaal patroon van ruisachtige ruwheid, de tweede het tweedimensionale patroon. De gevonden waarden corresponderen alleen met die vormverstoringen waarvan de "golfengte" ligt tussen $1,0$ en $60 \mu\text{m}$ n d niet bepaald r kromtestraal in mm.



Figuur 7 De bi-asfeer Ob kan als uitleeslens in een afspeelapparaat voor optische platen fungeren. DD optische plaat, roteert om de as a-a G laserlichtbron. L optiek voor bundelconditionering. B bundelsplitser D lichtdetectieschakeling. M kantelspiegel, houdt door middel van een servosysteem de lichtbundel gecentreerd op het spoor

Zoals uit de verzamelde meetresultaten in tabel 1 ook mag blijken, biedt de gebruikte meetopstelling voor oppervlakteruwheden een betrekkelijk eenvoudige en snelle vergelijkingsmogelijkheid.

Toepassingen van bi-asferische lenzen

Sinds enige tijd worden bi-asferische objectieven gemaakt die bedoeld zijn voor gebruik in de afspeelapparaten behorend bij de systemen LaserVision en Compact Disc; trouwens ook voor de uitlezing bij het DOR-systeem (Digital Optical Recording) van Philips lijkt toepassing van dergelijke objectieven een aantrekkelijke zaak. Behalve aan deze toepassingen, die meer in de sfeer van de massaproductie thuis horen, is ook gewerkt aan een bijzonder geavanceerde bi-asfeer, met een N.A. van 0,85, die geschikt is als inleeslens voor de apparatuur waarmee een zg. Masterplaat kan worden gemaakt, zowel voor LaserVision als Compact Disc. Bij beide soorten toepassingen eist men een kwaliteit die zo goed is dat zij enkel en alleen beperkt wordt door de buiging van het licht aan de lensranden. Zoals wij reeds zagen (figuur 1), is het inmiddels gelukt dergelijke lenzen van "buigingsbegrensd" kwaliteit te vervaardigen. In een wat later stadium zal waarschijnlijk een derde soort toepassingen van bi-asferische elementen voortkomen uit de mogelijkheid ook zoomlenzen van een (geoptimaliseerd) aantal asferische lensoppervlakken te voorzien. Het aantal optische componenten nodig voor één zoomlens wordt erdoor teruggebracht tot minder dan de helft – bij behoud van optische kwaliteit – zoals berekeningen hebben geleerd.

De uitlezing bij LaserVision

De informatie op een optische plaat van het systeem LaserVision bestaat uit een lang, spiraalvormig spoor van putjes. De kleinste afstand tussen twee opeenvolgende windingen van het spoor (de "spoed") is $1,7 \mu\text{m}$. De uitlezing van de informatie – het detecteren van de lengte der putjes en hun herhalingsfrequenties – geschiedt door aftasting met een lichtvlekje, dat het spoor nauwkeurig volgt. Het detectiesignaal, de optredende modulatie in het gereflecteerde licht, mag niet worden gestoord door "overspraak" van putjes uit naburige windingen. Het lichtvlekje heeft derhalve een uiterst bescheiden afmeting: de zg. halveringsdiameter bedraagt $0,9 \mu\text{m}$. Het ontstaat, kort gezegd, door het gebruik van een helium-neon-laser als lichtbron ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$) en een bi-asfeer van "buigingsbegrensd" kwaliteit als afbeeldend element. (Voor het andere

systeem, Compact Disc, gebruikt men een AlGaAs-laser met $\lambda = 820$ nm als golflengte). De N.A. van de bi-asfeer moet ten minste 0,40 bedragen om een beeldvlekje met een zo kleine maat als $0,9 \mu\text{m}$ te kunnen garanderen

De introductie van een bi-asfeer hier biedt het bekende voordeel dat het aantal optische elementen van oorspronkelijk vier (sferische lenzen) nu is teruggebracht tot één (bi-asferische lens). Zeker in massaproductie zou het nauwkeurig aligeneren van alle brekende oppervlakken bij vier lenzen een moeilijke en kostbare handeling geworden zijn. Een tweede voordeel is de vrije ruimte tussen de lens en de plaat, die is groter dan voorheen. Het punt van afbeelding kan namelijk bij de nieuwe lens gemakkelijk verder weg worden gekozen.

De rotatie van de optische plaat geschiedt onvermijdelijk niet helemaal zuiver centrisc. Als gevolg daarvan moet de afbeelding van de bi-asfeer over een veld diameter van ongeveer $500 \mu\text{m}$ redelijk constant zijn. Het beeldvlekje blijft dan het spoor van putjes goed aftasten, ondanks de (kleine) slingering van het middelpunt van de plaat tijdens zijn rotatie.

Hoe de bi-asfeer als onderdeel van een platenspeler bij de uitlezing functioneert is volledigheidshalve nog in figuur 7 afgebeeld.

De inleeslens voor Master-platen

Het schrijven van informatie op een Master-plaat, zowel voor LaserVision als voor Compact Disc, moet met een zo groot scheidend vermogen geschieden, dat een N.A. van 0,85 noodzakelijk is. Gelukkig behoef de diameter van het bruikbare veld niet groter dan $5 \mu\text{m}$ te zijn. De fabricage van een dergelijke, nogal exotische lens op de COLATH en ook de controlemetingen ervan, hoewel niet eenvoudig, mogen inmiddels tot de beschikbare expertise worden gerekend. Als bewijs van optomechanisch kunnen, zij hier vermeld dat de tolerantie op de lensdikte ca. $3 \mu\text{m}$ bedraagt, op de decentrerings ca. $1,5 \mu\text{m}$ en op de scheefstand minder dan $0,2$ mrad.

Wij willen dit artikel niet besluiten zonder op te merken dat bij Philips, en ook elders, de asferica inmiddels de startfase duidelijk achter zich heeft. De verdere weg, naar een nieuw type optische industrie, kan betreden worden.

[1] Voor een bespreking van de ruimtelijke frequentieresponsie, ook wel "transmissiefactor" genoemd, zie M Born en E Wolf, Principles of Optics, 5e druk Pergamon, New-York, 1975, blz. 480, alsmede hoofdstuk 9 van E B Brown, Modern optics, Reinhold, New York 1965. De auteurs danken dr. J J M Braat voor de uitvoering van de berekeningen.

[2] Ziee L.C. Martin, Technical Optics, Vol II, 2 druk, Pitman, Londen, 1961, blz. 318.

[3] J.G. Dil, W. Mesman en J.C. Driessen, High-precision measurement of aspheric surfaces, Proc. SPIE 235, 85-90, 1980. Zie ook J.G. Dil, P.F. Greve en W. Mesman, Appl. Opt. 14 553-557, 1978.

[4] E.L. Church, H.A. Jenkinson en J.M. Zavada, Measurement of the finish of diamond-turned metal surfaces by differential light scattering, Opt. Eng. 16, 360-374, 1977. Zie ook T.V. Vorburger en E.C. Teague, Optical Technics for on-line measurement of surface topography, Precision Eng 3, 61-83, 1981.

[5] De auteurs danken in het bijzonder dr. ir. P.P.J. van Engelen, medewerker van het Natuurkundig Laboratorium, die de methode van meten heeft onderzocht, de praktische uitvoering ervan verwezenlijkt en de vermelde metingen en berekeningen verricht.

[6] T.R. Thomas, Characterization of surface roughness, Precision Eng 3, 97-104, 1981

vakvaria

Welke nauwkeurigheid kan men nog meten?

We hebben eerder bericht dat de Lawrence Livermore Laboratories een supernauwkeurige verticale diamant-draaibank hebben ontwikkeld die geen grotere afwijking tussen geprogrammeerde maat en feitelijke maat mag hebben dan $0,0275 \mu\text{m}$. Om deze nauwkeurigheid te kunnen bereiken is de machine met speciale meetapparatuur uitgerust waaronder zeven laser-interferometers. De machine moet asferische lenzen kunnen maken tot

een diameter van 1600 mm en in een cilinder van max. 500 mm lengte. Het meten van deze nauwkeurigheid en de ontwikkeling van de desbetreffende meetapparatuur worden verzorgd door het National Bureau of Standards. Het probleem is, aldus mr. Tyler Esther, fysicus van genoemd bureau, dat de machine nauwkeuriger is dan wij met enige zekerheid kunnen meten. Interferometrische metingen worden beïnvloed door de brekingsindex van het licht, vooral door lucht. De brekingsindex op zijn beurt is een functie van temperatuur, druk en vochtigheid. Daarom werken de interferometers in vacuüm met flexibele metalen balgen die de bewegende delen verbinden.

Maar we komen met onze draagbare interferometeropstelling van buiten, aldus Esther, en dus moeten we toch corrigeren op omgevingsinvloeden op de brekingsindex. Dat kan alleen empirisch en op basis van vergelijkende, historisch vastgelegde meetgegevens. Natuurlijk, het hier gesignaleerde geval is extreem, maar steeds meer machines zijn in staat binnen het micrometerbereik en zelfs submicrometer-bereik te produceren. Het lijkt onvermijdelijk dat de desbetreffende meetapparatuur en meetruimten aan deze extreme nauwkeurigheden moeten aanpassen. Goed geoutilleerde en geautomatiseerde meetkamers zijn voor dit soort precisemetingen onmisbaar.