

# Asferica I

## Optomechanica, een ultrafijne bewerkingstechniek

Dr.ir. J. Haisma en

ir. T. Gijsbers, Philips Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven

Het begrip "optomechanica" wordt door ons gemeenlijk gehanteerd als het gaat over het fabriceren van uiterst nauwkeurige asferische *optische* elementen door middel van *mechanische* (verspanende) bewerkingen op numeriek bestuurd machines. De ter controle van zulk werk uitgevoerde metingen zijn ook van optische aard. Tot de bedoelde bewerkingen wordt zowel het draaien als het (glad)slijpen gerekend.

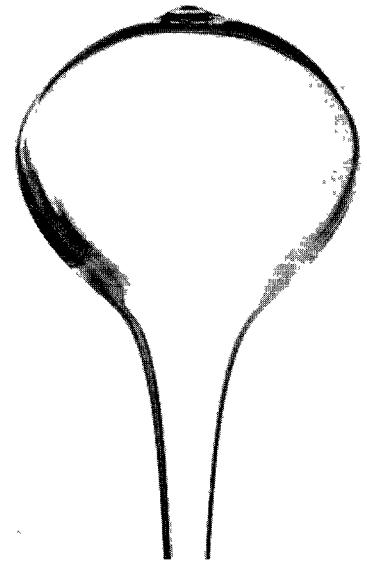
Dit eerste deel beperkt zich tot een inleiding over de nieuwe methode van fabriceren en een afweging van haar positie binnen de toegepaste geometrische optica. Daar zijn de laatste jaren de grote veranderingen vooral veroorzaakt door de steeds verder gegane verfijning van het draaien als bewerkingsmogelijkheid. Veel van het optomechanische werk dat binnen het Natuurkundig Laboratorium is verricht op de COLATH, de in 1978 in gebruik genomen precisiedraaibank met computerbesturing, illustreert die vooruitgang in de toegepaste geometrische optische optica [1, 2]. Het geboekte resultaat lijkt niet toevallig; in de toegepaste optica heeft het te baat kunnen nemen van een nieuwe fabricagemethode – inclusief meten en beproeven – meer dan eens de kans op succes vergroot. Ook optomechanica is zo'n methode gebleken, de reden waarom dit artikel begint met gegevens over de kwaliteiten ervan en iets uit de voorgeschiedenis.

In de jaren zeventig waren slechts weinige instituten en bedrijven actief betrokken bij het technisch-wetenschappelijk onderzoek aan deze nieuwe methode van fabriceren. Men heeft toen op een enkele speciale machine bij het numeriek bestuurd draaien met diamantbeitels de bewerkingsnauwkeurigheid weten te bereiken welke op precisiebanken met handbediening alleen mogelijk was voor eenvoudige vormen, zoals platte vlakken en omwentelingscilinders. Die bewerkingskwaliteit is redelijk vergelijkbaar met de resultaten van het conventionele ultrafijne slijpen en (glad)polijsten. De laatstgenoemde, soms nog met de hand uitgevoerde, bewerkingen werden – en worden – gebruikt voor het maken van lenzen en spiegels van de hoogste kwaliteit.

Voor een aantal materialen, zoals verspanbare kunststoffen en non-ferrometalen en hun legeringen, begon het in de tweede helft van de genoemde periode te gelukken de afwijkingen in

*In één van de weinige overgebleven microscopen van Antoni van Leeuwenhoek (1632–1723) zit een dubbelbol lensje dat asferisch is en dat hoogstwaarschijnlijk niet door slijpen gemaakt is. De asfericiteit veroorzaakt het grote scheidend vermogen; de nu nog constateerbare waarde van 1,35 µm is een factor anderhalf à twee beter dan het scheidend vermogen van de lensjes in de andere microscopen van Van Leeuwenhoek. Een toevalligheid, of een extra bewijs van het scherpe opmerkingsvermogen van de beroemde Delftenaar? We weten het niet. Of Van Leeuwenhoek zelf die lens heeft gemaakt en hoe precies, weten we evenmin. Wel heeft een Nederlandse opticus onlangs laten zien dat bij het blazen van een glazen bol met een diameter van enige centimeters op een top een verdikking ontstaat, die soms goed bruikbaar is als sterk vergrotend (asferisch) lensje. De titelfoto toont zo'n bol met de verdikking centraal op de bovenkant ervan. Twee Duitsers, de broeders Von Uffenbach, bezochten Van Leeuwenhoek in Delft, toen deze al achtenzeventig jaar was, en veel later rapporteerde een van hen het besprokene in het boek "Merkwürdige Reisen durch Niedersachsen Holland und Engelland" (Ulm 1754). Daaruit blijkt dat de andere broer destijds Van Leeuwenhoeks commentaar dergelijke lenzen, die niet rond waren, door blazen*

*te kunnen maken, gewoon aanzag voor "Holländisch gejoekt". Blazen, vond deze Von Uffenbach, kan niet anders dan tot een zuivere bolvorm leiden. De man sprak in zoverre een profetisch woord dat tegenwoordig asferische lenzen inderdaad niet worden geblazen. In plaats van riskant handwerk is er bij Philips als fabricagemethode het ultrafijne draaien en slijpen op de COLATH, een speciale draaibank die in jaargang 21, 1981, nr 3 en 4 van Mikroniek beschreven is. Ondanks veel automatisering is die moderne bewerkingstechniek een boeiende activiteit gebleven, met "optomechanische" topprestaties zoals een oppervlakteruwheid die beneden 5 nm blijft (duidelijk minder dan een procent van de lengte van een lichtgolf in het rood!). Hoe aantrekkelijk de voordelen van asferische brekende oppervlakken in de toegepaste geometrische optica wel zijn en hoe het ontwerpen, alsmede het maken en meten ervan, mogelijk is, komt in dit in twee delen gesplitste artikel Asferica goed naar voren. Wie beeldfouten op de schaal van een micrometer en minder ter lijf wil gaan – nodig bijvoorbeeld voor de uitleessystemen bij Compact Disc en LaserVision platen – mag in zijn fabricagemethodes derhalve de corresponderende, uitzonderlijk kleine toleranties voor de vorm der lenzen, etc niet negeren. De benadrukte "optomechanische" bewerkings-*



*techniek voor het maken van asferische afbeeldingselementen blijkt aantrekkelijke oplossingen te bieden, waarmee inmiddels een ervaring van een achttal jaren is opgebouwd. Zoals ook in dat historische gesprek van de Von Uffenbachs met Van Leeuwenhoek gebeurde, krijgt in dit artikel de vraag naar het hoe van het maken de voorrang*

de vorm van de asferische werkstukken bij het draaien kleiner te houden dan een paar tienden van  $1 \mu\text{m}$ , terwijl men er tevens in slaagde de oppervlakteruwheid tot waarden kleiner dan  $20 \text{ nm}$  (piek-dal) te reduceren [1].

Ook voor enige soorten optisch glas kon in die zelfde tijd een methode van (transparant) verspanen, met beitels van bijvoorbeeld hafniumnitride, worden ontwikkeld, zij het zonder numerieke besturing [3]. De daarmee bereikte oppervlakteruwheden hadden overeenkomstige waarden, maar de afwijkingen in de vorm lagen een orde van grootte ongunstiger dan het zojuist genoemde getal.

Naast het draaien als technische vaardigheid, heeft ook het slijpen en polijsten een uitgebreide geschiedenis. Vooral voor het maken van brillleglazen is het slijpen en polijsten van glas waarschijnlijk in de veertiende eeuw reeds beoefend, zo niet eerder. Het bewerken van verschillende materialen op een soort draaibank moet al de Romeinen vertrouwd zijn geweest.

Het draaien en het slijpen (polijsten) zijn dus heel oude vakgebieden, wat bepaald niet betekent dat er nu weinig in zou omgaan. Sinds het samenkomen van deze twee gebieden op onge-

veer één zelfde niveau van nauwkeurigheid en reproduceerbaarheid nog niet zo lang geleden, mag men van de verdere ontwikkelingen, die nu immers gemeenschappelijk kunnen verlopen, een versterkte aanzet tot innovatie verwachten.

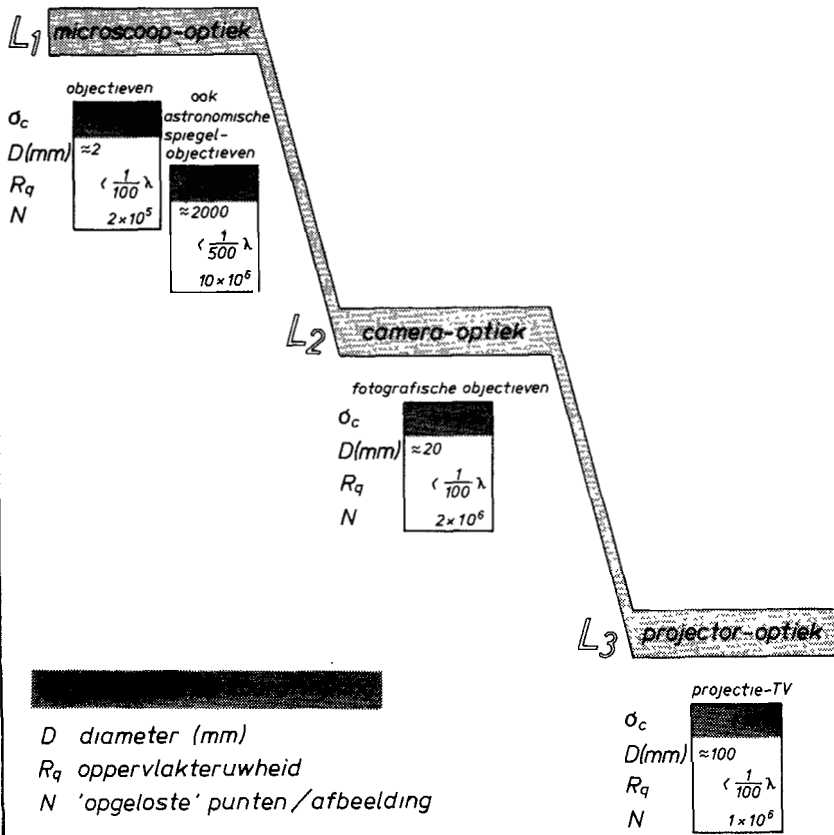
Binnen een paar jaar heeft zo, in het verlengde van de bestaande vaardigheden, de optomechanica als ultrafijne bewerkingstechniek gestalte gekregen. In overeenstemming met de naam vormen de problemen van de optica – meestal die van de toegepaste geometrische optica – een krachtige stimulans voor degenen wie de nieuwe bewerkingsmogelijkheden ter dienste staan. De flexibele veelzijdigheid vloeit voort uit de mogelijkheid die een geavanceerde numerieke besturing van de betrokken draaiban oplevert. Daardoor blijkt het maker van allerhande asferische oppervlakken, en natuurlijk ook van sferische oppervlakken (beide rotatiesymmetrisch), nagenoeg alleen een kwestie te zijn van aangeven van de coördinaten voor de verlangde contouren. ("Nagenoeg" is hier gebruikt ter waarschuwing. Ondanks de automatisering zijn in het werk met machines zoals de COLATH menselijke zorg, deskundig-

heid en regelmatige controle onontbeerlijk, in het bijzonder ook bij de voorbereidingen).

Verder ontwikkelingswerk aan de COLATH, verricht het Natuurkundig Laboratorium, heeft geleid tot de vervaardiging van een slijptol. Deze kan, in plaats van de beitel, op de machine worden gemonteerd. De faciliteiten van de numerieke besturing gelden ook voor de slijptol.

Op deze wijze is men erin geslaagd het draaien en het (glad)slijpen als precisiebewerkingen samen te brengen binnen het kader van één, grotendeels geautomatiseerde techniek voor "punt-coördinaatbewerking". De typing "punt-coördinaat" houdt in dat deze techniek voor draaien en slijpen tot en met "polijstkwiteit" gebruik maakt van een contactgebiedje met de maten van een "punt" (grootste afmeting enige tientallen  $\mu\text{m}$ ).

De onnauwkeurigheid van de COLATH is absoluut gerekend ca.  $1 \mu\text{m}$  binnen zijn totale werkgebied (van  $200$  bij  $200 \text{ mm}$ ). Dit getal is inclusief de aligneringsfouten in de machine en de afrondingsfouten voortvloeiend uit de numerieke besturing. Bij de kleinere oppervlakken is de behaalde absolute



Tabel 1. De voor de vervaardiging van lenzen en spiegels in de toegepaste geometrische optica relevante precisie. De drie daarin onderscheidbare niveaus ( $L_1$ ), die betrekking hebben op de hoogste nauwkeurigheid, een middengebied en de lagere waarden, zijn aangeduid met resp. "microscoop-optiek", "camera-optiek" en "projector-optiek". De gekozen namen refereren aan de instrumenten of toestellen die op het betrokken niveau het meest worden gemaakt. Het onderscheid berust hoofdzakelijk op het verschil in maximale contourafwijking (= langzame vormfout) van de lenzen en spiegels. Alle afwijkingen – gerekend ten opzichte van een "ideale" vorm – zijn uitgedrukt in  $\lambda$ , de gemiddelde golflengte van het in het betrokken instrument te gebruiken deel van het spectrum. De ruwheidstoleranties ( $R_q$ ) zijn een maat voor de gladheid van de gemaakte oppervlakken (Zie vooral de paragraaf "Bewerkingscontrole" in deel II). Voorbeelden van de diverse lenzen en spiegels, met een karakteristieke afmeting (de diameter  $D$ ), zijn in de tabel opgenomen. De grootte  $N$  is een maat voor het scheidend vermogen, het getal is een schatting van het maximale aantal voorwerpapunten dat per afbeelding goed gescheiden kan worden waargenomen.

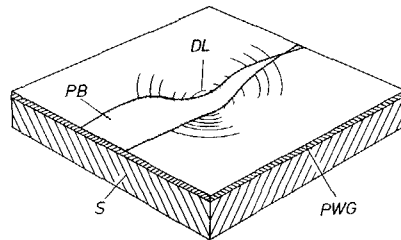
nauwkeurigheid nog beter (afwijkingen kleiner dan  $0,2 \mu\text{m}$ ). De oppervlakteruimte van de werkstukken blijft tot waarden kleiner dan  $10 \text{ nm}$  (topdal) te kunnen worden gereduceerd. Identiek bedoelde werkstukken vertonen maatverschillen die kleiner dan  $50 \text{ nm}$  kunnen zijn.

Het geïntroduceerde slijpen vormt de garantie dat harde en brosse materialen (optisch glas, diverse staalsoorten) ook goed kunnen worden bewerkt, en dus als werkstukmateriaal niet behoeven te worden vermeden. Uitzonderingen daargelaten, kan in de praktijk aan de vaak strenge eisen van de toegepaste geometrische optica goed worden voldaan.

In hun algemeenheid corresponderen die eisen met een aantal niveaus van nauwkeurigheid; gewoonlijk onderscheidt men er drie. Tabel 1 bevat deze drie niveaus met enkele van hun karakteristieke getallen, alsmede voorbeelden van de verschillende typen optische componenten of stelsels die erbij betrokken zijn. De "gemiddelde" golfte van het spectrum is een goede eenheid van lengte om dit soort gevallen te bekijken. Naar verwachting zal de optomechanica het meest bijdragen aan toepassingen op de hoogste nauwkeurigheidsniveau. De eerste belangstelling hiervoor op industriële schaal is binnen het Philips Concern intussen duidelijk aanwezig. Zeker op wat langere termijn is echter een verschuiving naar de twee groepen met minder nauwkeurigheid niet uitgesloten.

De vervaardiging van sterk asferische oppervlakken van optische kwaliteit is het grootste winstpunt dat de optomechanica in haar korte bestaan al heeft gebracht. Dit is van zoveel belang, omdat men sedert lange tijd uit berekeningen weet dat het vervangen van twee sferische vlakken in een optisch stelsel door asferische omwentelingsvlakken zowel sferische aberratie als coma, twee ernstige beeldfouten, zou moeten kunnen elimineren.

Bovendien wordt de laatste tijd intensief ontwikkelingswerk gedaan aan planaire optica, waarbij zg. geodetische componenten veel aandacht krijgen [4]. Zulke optische elementen geleiden lichtbundels volgens geodetische lijnen op hun oppervlak. (Geodetische lijnen van een oppervlak zijn de kortste lijnen die gegeven paren punten ervan verbinden en die geheel in het desbetreffende oppervlak liggen). Dergelijke oppervlakken kunnen sterk asferisch gebogen omwentelingsvlak-



*Figuur 1 In het nogal nieuwe gebied der planaire optica bestudeert men de voortplanting van licht in een vlakke golfgeleider (PWG). Een asferische deformatie van het vlak van de golfgeleider kan lenswerking doen ontstaan, zoals hier is afgebeeld. Een dergelijke lens (DL) wordt wel een geodetische lens genoemd, omdat de lichtstralen geodetische curven volgen (Engels. depression lens). PB de te focuseren vlakke lichtbundel. S substraat van de golfgeleider.*

ken zijn; de geleiding is bedoeld om lichtbundels te besturen, dat wil zeggen af te buigen, te verdelen, of te focuseren (figuur 1).

Bij zeer nauwkeurige lenzen en spiegels lijkt tegenwoordig de uitrusting met asferische oppervlakken het gehele traject te hebben doorlopen van een theoretisch idee, aantrekkelijk maar nauwelijks te verwezenlijken, tot een betrouwbare industriële uitvoerbaarheid, snel en efficiënt [5]. Om beter te begrijpen wat voor veranderingen de optomechanica meebrengt, brengt, helpt het wellicht hier de klassieke optische fabricage in herinnering te roepen [6]. Asferische elementen in het bijzonder veroorzaakten grote problemen, hoofdzakelijk omdat, zoals Scott het uitdrukt [6], "the natural actions of grinding and polishing force optical surfaces towards spheres". De standaardtechniek voor slijpen en polijsten, die gebruik maakt van contact over het gehele oppervlak, biedt het voordeel dat de nauwkeurigheid van de vorm en de kwaliteit (gladheid) van het oppervlak van de optische component gelijktijdig worden verbeterd. Dit voordeel gaat echter verloren zodra asferische vlakken bewerkt moeten worden, aangezien bij de roterende bewegingen dan een permanent contact over het gehele oppervlak in het algemeen niet mogelijk is.

De standaardmethode van slijpen en polijsten voor de fabricage van optische elementen maakt gebruik van machines met twee roterende onderdelen waarvan de oppervlakken in slippend contact zijn. Het eerste onderdeel, het "blok", draagt de in bewerking zijnde lens of spiegel; via het tweede, de "kom", wordt een (zacht) schuurmiddel toegevoegd, zoals poeder-vormig aluminiumoxide gemengd met wa-

ter. Het slijpen (of polijsten) vindt plaats in het contactgebied dat de beide roterende onderdelen gemeen hebben. Een van beide, doorgaans het blok, wordt aangedreven door een verticale as, hetgeen het andere deel een zodanige rotatie geeft dat elk punt van het onderste vlak wrijft langs ieder punt van het bovenste. Het werk wordt hier gedaan door een "oneindig" aantal (losse) poederkorrels gezamenlijk, dit in duidelijk contrast met de bewerking in één "punt" op een draaibank, zoals dat op de COLATH gebeurt.

De fabricage van brillenglazen vormt eigenlijk de enige tak van de klassieke optische industrie met een grote productie van asferische lenzen. De toleranties die voor brillenglazen optisch toelaatbaar zijn, hebben zulke grote waarden dat de gesignaleerde problemen en principiële moeilijkheden hun betekenis verliezen. Het maken van de goede lensvorm en het polijsten mogen *afzonderlijk* worden uitgevoerd. Een bepaalde lensvorm die door slijpen ontstaan is, en goed is, kan worden *nagepolijst*, zonder dat dit de goede vorm in visueel merkbare mate hoeft te beïnvloeden. Vanzelfsprekend horen de brillenglazen niet thuis op het niveau van de hoogste nauwkeurigheid in tabel 1. De zg. cilinderlenzen zijn een tweede, zij het minder belangrijk, voorbeeld van asferische lenzen die langs conventionele weg gemaakt kunnen worden. De klassieke technologie, kent ook nog een lijnvormig contactgereedschap, een "schra-per", om asferische oppervlakken te maken [6, 7]. De onnauwkeurigheid van zulke schrapers ligt in de orde van  $10 \mu\text{m}$ , wat veel te groot is voor bijvoorbeeld de microscoop-optiek (tabel 1).

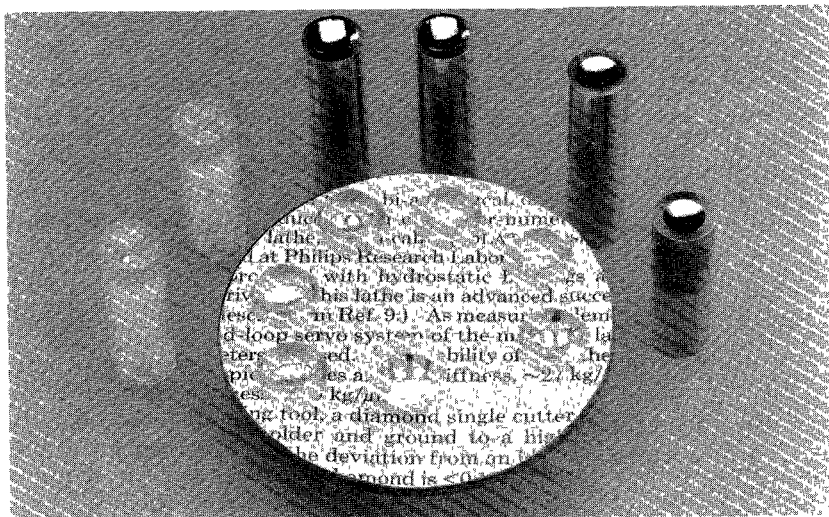
In *figuur 2* ziet men voorbeelden van hetgeen er op het ogenblik optomechanisch zoal kan. Door het draaien van een stuk kunststof op de COLATH is deze rij van slechts door natuurlijke buiging aan de rand begrensde, dat wil zeggen een zo groot mogelijk scheidend vermogen bezittende, bi-asferische lenzen gemaakt, met een numerieke apertuur van  $0,43$ . De lens op de voorgrond in het midden heeft een nog veel grotere numerieke apertuur ( $0,85$ ). De achterste rij laat vier stalen mallen zien voor het persen van glazen lenzen, alsmede een tweetal kwartsglazen mallen voor hetzelfde doel. De zes mallen zijn op de COLATH (glad)geslepen.

Deze goede resultaten, die nog zwaarder tellen door de sterk uitgebreide mogelijkheden voor de variatie in de te produceren lensvormen, betekenen

niet dat de optomechanica zonder problemen zou zijn. De draaibank, het gebruikte gereedschap en het werkstuk moeten in alle opzichten voldoen aan uitzonderlijk strenge eisen, bijvoorbeeld ten aanzien van besturingsmogelijkheden, kwaliteit der gereedschappen, stabiliteit, vorm van het voorbereide werkstuk. Het laatstgenoemde punt betekent dat de zogenaamde voorvorm van de gewenste optische component geen onregelmatigheden mag vertonen die machine-resonanties zouden kunnen opwekken gedurende de bewerking.

De *technicus* achter de machine moet zich realiseren dat alle delen van een ontworpen optisch stelsel en alle betrokken gereedschappen en materialen nauwkeurig op elkaar dienen te zijn afgestemd. Bovendien behoort hij zich ervan te vergewissen dat zijn gereedschappen voor de ultrafijne bewerkingen in een zo goed mogelijke conditie verkeren. Dienovereenkomstig moet de *ontwerper* van een optisch stelsel kennis dragen van bepaalde beperkingen van de machine, bijvoorbeeld ten aanzien van de opspanmogelijkheden, alsmede van de maximaal toelaatbare asferische "steilheid". Goede communicatie tussen de technicus en de optische ontwerper vanaf het begin is een noodzakelijke voorwaarde voor succes in de optomechanica. De toepassing van optomechanica blijft technische afstemming vragen inzake functionele innovatie, ontwerpontwikkeling en kwaliteitsbewaking gedurende de voorbereiding en de fabricage (vorm, oppervlak, positionering qua centrering en klemming).

In het tweede deel van dit artikel komt een groep bi-asferische lenzen die met de COLATH gemaakt zijn, als een voorbeeld van gewone fabricage aan de orde. Verschillende bijzonderheden van de gevolgde bewerkingstechniek worden besproken. De hechte relatie tussen maken en meten (of beproe-



*Figuur 2 De afgebeelde voorwerpen zijn langs "optomechanische" weg tot stand gekomen op de COLATH. De lenzen, elk voorzien van twee asferische oppervlakken, zijn door draaien van polymethylmethacrylaat gemaakt, zonder enige nabewerking. De resterende oppervlakteruwheid en eventuele onnauwkeurigheden in de lensvorm zijn zo gering dat de grootste beeldfout de diffractie is, veroorzaakt door de begrensdheid van de lensapertuur. De overige voorwerpen zijn mallen, van staal en van kwartsglas, bedoeld voor het persen van glazen lenzen. Deze mallen zijn op de COLATH geslepen; ook zij voldoen aan de hoogste eisen van gladheid en vormnauwkeurigheid.*

ven) krijgt aandacht, evenals een indeling van vormfouten. Daarbij zullen de periodieke sporen op het oppervlak afkomstig van machinale bewerking en hun effect op de kwaliteitsbewaking worden behandeld, alsmede de oppervlakteruwheid. Tot slot komt de toepassing van de asferica in de optische uitleeseenheden van de systemen LaserVision en Compact Disc ter sprake. Hierop sluit aan een summier beschrijving van het reeds in figuur 2 afgebeelde bi-asferische objectief met de bijzonder grote numerieke apertuur (0,85). Het wordt gebruikt voor het maken van de "Master"-platen in het reproductieproces zowel voor Compact Disc als voor LaserVision.

#### Literatuur

[1] T.G. Gijsbers, De COLATH, een numeriek bestuurd draaibank met zeer hoge precisie, Philips Techn T. 39, 205-221, 1980

[2] J. Haisma, E. Hugues en C. Babolat, Realization of a bi-aspherical objective lens for the Philips Video Long Play system, Opt Lett. 4, 70-72, 1979.

[3] R. Brehm, K. van Dun, J.C.G. Teunissen en J. Haisma, Transparent single-point turning of optical glass phenomenological presentation, Precision Eng. 1, 207-213, 1979.

[4] S. Sottini, V. Russo en G.C. Righini, Geodesic optics new components, J. Opt. Soc. Am. 70, 1230-1234, 1980

[5] Aspheric optics design, manufacture testing, Proc. SPIE 235, Soc Photo-Opt. Instr. Eng., Bellingham, WA, 1980

[6] R.M. Scott, Optical manufacturing, in: R. Kingslake (red.), Applied optics and optical engineering, Vol. III, Academic Press, New York 1965, blz 43-95

[7] Bij de afwerking van omwentelingsoppervlakken waaraan kegelsneden ten grondslag liggen, bijvoorbeeld een paraboloïde, is de natuurlijke en wederzijdse correctie tussen oppervlak en "schraaper" mogelijk. Zie L.C. Martin, Technical optics, Vol II, 2e druk, Pitman, Londen 1961, blz 353-356