

# Materialen met lage uitzettingscoëfficiënt ten behoeve van het maken van meetapparatuur van hoge precisie

Ing. R. Brehm, J.C. Driessen, P.W. van Grootel en Ir. T.G. Gijsbers, medewerkers van het Philips Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven

## Samenvatting

Dit artikel beschrijft de werking en de mechanische constructie van een instrument waarmee de vorm van asferische oppervlakten met  $\pm 5$  nm deviatie gemeten kan worden. De werking ervan berust op het principe van de optische differentiaalmeting. Om maximale nauwkeurigheid te bereiken is dit instrument gebouwd in glaskeramik (Zerodur) en Invar.

Aandacht wordt geschonken aan de selectie van deze thermisch stabiele materialen en de bewerking ervan.

## Inleiding

De ontwikkeling van de optische beeldplaat heeft de interesse in ontwerp [2], fabricage [3, 4] en meetmogelijkheden [1, 5] van asferische lenzen sterk gestimuleerd. Deze lenzen dienen als lichtgewicht objectieven en zijn bedoeld om de duurdere lenzenstelsels, bestaande uit een aantal lenzen, zoals die nu veelal worden gebruikt, te vervangen.

De numerieke apparatuur (N.A.) van de asferische lenzen is van de orde  $NA \approx 0,5$  en ze zijn buigingsbegrensd. De gewenste beeldkwaliteit stelt hoge eisen aan toleranties op de vorm en op de oppervlakterutheid (RMS). Deze liggen op respectievelijk een kwart en een vijftigste van de golflengte van het te gebruiken licht. Dit artikel beschrijft het ontwerp van een meetapparaat om deze vormafwijkingen met de gewenste nauwkeurigheid vast te kunnen stellen.

## Meetmethode

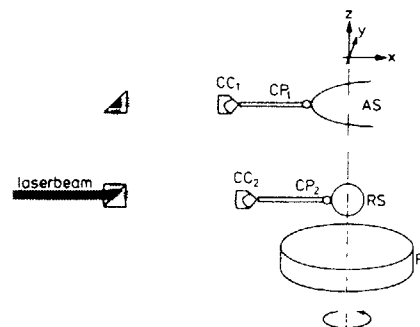
Bij de gebruikelijke meetmethode om een asferisch lensoppervlak te meten wordt de lens geplaatst op een draaitafel met een zeer nauwkeurige lagerconstructie. De asfericiteit wordt dan gemeten als de functie van de hoek door middel van een contactmeting. De metingen worden verwerkt door een computer waardoor de systematische fouten kunnen worden berekend. Fouten als gevolg van thermische drift en niet reproduceerbare bewegingen van een precisiedraaitafel beperken echter de maximaal bereikbare nauwkeurigheid tot de ongeveer 100 nm.

Om de meetnauwkeurigheid te verhogen is een instrument ontwikkeld waarbij de invloed van de radiaalfouten bij rotatie van de draaitafel tot een minimum zijn teruggebracht. Het principe is gebaseerd op een optische

differentiaal-meettechniek zoals beschreven door J.G. Dil [1]. Een taster  $CP_1$ , zie figuur 1, is in contact met het asferische oppervlak AS dat gemeten moet worden. Deze asfeer is bevestigd op een draaitafel op zodanige wijze dat zijn geometrische middelpunt binnen ongeveer  $100\mu\text{m}$  op de rotatieas ligt. Een tweede taster  $CP_2$  is in contact met een referentiekogel RS die bevestigd is op dezelfde draaitafel onder de te meten asfeer. Op het eind van iedere taster is een klein kubisch prisma ( $CC_1$  en  $CC_2$ ) gemonteerd. Deze prisma's dienen als bewegende spiegels in de lichtwegopstelling van een laser interferometer. Als gevolg van deze opstelling wordt de radiale fout in de beweging van de draaitafel, in de eerste orde, op ieder moment gecorrigeerd.

## Constructie

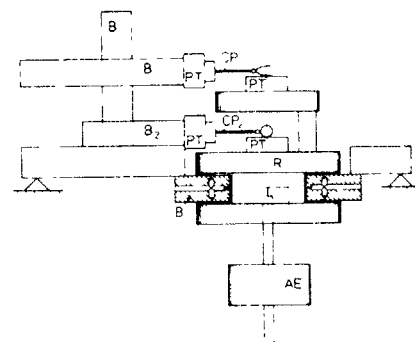
De mechanische stabiliteit van de meetopstelling, zoals getoond in figuur 1, moet erg hoog zijn, omdat geëist wordt dat over circa een uur het verschil in lengte van de lichtwegen van de twee tasters niet meer mag



Figuur 1 De meetgeometrie:  $CC_{1,2}$  zijn kubische prisma's,  $CP_{1,2}$  zijn de tasters, AS is de asfeer die gemeten moet worden, RS is de referentie-sfeer en R is de draaitafel.

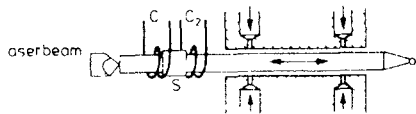
veranderen dan 5 nm indien het instrument in rust is. Bovendien bestond de wens om in staat te zijn asferen te meten waarbij gebruik gemaakt wordt van kogels met een referentieradius tot ongeveer 100 mm. Als gevolg hiervan worden hoge eisen gesteld aan de xz-positionering over een afstand van circa 100 mm van de taster  $CP_1$ . Om de tasters met de rotatie-as uit te lijnen is het nodig dat een goede yz-instelling mogelijk is en xy-positioneertafels zijn nodig om de asfeer te centreren op de draaitafel. De mechanismen voor dit positioneren moeten zodanig gemaakt zijn dat gedurende en na het bevestigen geen verplaatsing of drift optreedt.

Het principe van deze constructie wordt getoond in figuur 2. Drie bijna vierkante blokken  $B_1$ ,  $B_2$  en  $B_3$  vormen een stijve kinematische constructie die een juiste xz-positionering van taster  $CP_1$  mogelijk maakt. Aan de einden van de blokken  $B_1$  en  $B_2$  zijn yz-positioneertafels PT gemonteerd om de tasters uit te kunnen lijnen met de rotatie-as.



Figuur 2 Constructie van het apparaat:  $B_{1,3}$  zijn blokken van Zerodur, PT zijn de positioneertafels van Invar, B is het bronzen huis voor de draaitafel R die is gemonteerd op luchtlagers.

De tasters hebben lucht-gelagerde verplaatsingsopnemers bestaande uit een as in een huis; zie figuur 3. Instelling van de meetkracht wordt bereikt door de juiste stroom te sturen door de spoelen  $C_1$  en  $C_2$  die voor de goede werking een op de as gemonteerde kern van weekijzer S hebben. De meetkop van het apparaat bevat de instelbare blokken  $B_{1,3}$ , de yz-positioneertafels en de tasters. Dit geheel is gemonteerd op een basisplaat waarop ook de draaitafel R is geplaatst.



Figuur 3 Taster:  $C_{1,2}$  zijn spoelen, S is het weekijzer.

De draaitafel bestaat uit twee parallelle schijven verbonden door een as, die samen een lucht-gelagerde as vormen met het huis B. Deze constructie elimineert axiaal kantelen van de as, hetgeen zou leiden tot een meetfout. Om deze mogelijke fout verder te verkleinen grijpt de koppeling tussen de hoek-encoder AE en de draaitafel precies aan in het middelpunt van de as. Op de draaitafel zijn twee tafels geplaatst die verbonden zijn door balken. Op de onderste tafel wordt de referentiekogel geplaatst, op de bovenste de asfeer die gemeten wordt. Zowel de referentiekogel als de asfeer worden gecentreerd op de rotatie-as d.m.v. de xy-positionertafels PT. De uiteinden van de tasters bestaan uit een saffier met een radius van 1 mm.

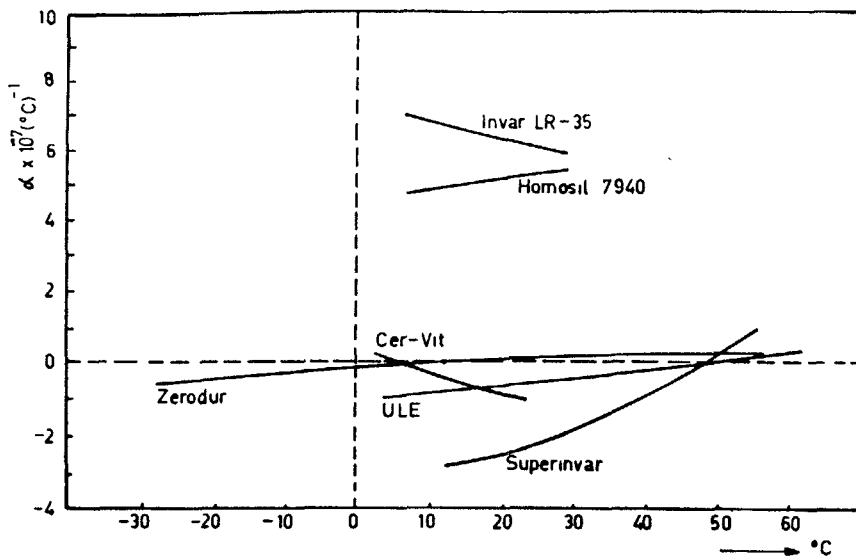
De relatief grote radii van de tastertips leiden tot een "schijnbaar" verkleinen van de oppervlakterutheid. Voor het meten van de oppervlakterutheid wordt de saffieren tastertip dan ook verwisseld voor een tip van diamant met een aangepaste radius. Het gehele instrument is gemonteerd op een tegen trillingen geïsoleerde tafel en opgesteld in een ruimte waar de temperatuur beheerst wordt.

## Materiaalkeuze

Om de gewenste precisie te bereiken is besloten gebruik te maken van constructiematerialen met een zeer lage uitzettingscoëfficiënt. Een aantal materialen met dergelijke eigenschappen is de afgelopen jaren ontwikkeld en ook commercieel verkrijgbaar. Deze materialen met lage thermische uitzettingscoëfficiënt kunnen worden verdeeld in drie categorieën: (a) materialen gebaseerd op de structuur van kwartsglas; (b) glas-keramieken die een speciale warmtebehandeling hebben ondergaan en (c) speciale legeringen van ijzer en nikkel. Homosil, Cer-Vit, Zerodur en (Super)Invar zijn een paar voorbeelden van dit soort materialen; zie figuur 4 voor hun thermische uitzettingscoëfficiënt. Naast de uitzettingscoëfficiënt is de vormstabiliteit in de tijd van belang voor de stabiliteit van een constructie.

Zerodur\* is een materiaal met een

\*Zerodur wordt gefabriceerd door Schott, Mainz



Figuur 4 Thermische uitzettingscoëfficiënt van een aantal bijzondere materialen.

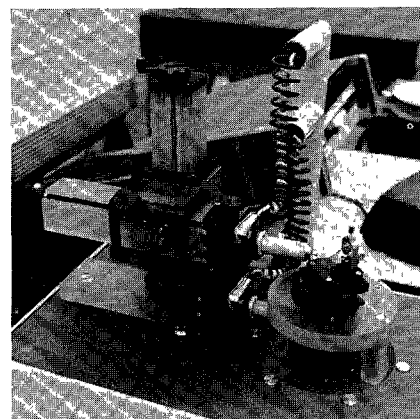
buitengewoon lage uitzettingscoëfficiënt vergeleken met andere materialen: ongeveer  $1 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$  tussen  $-30$  en  $70^{\circ}\text{C}$ . Het is een transparant en zeer homogeen glas-keramiek, en vanwege zijn relatief hoge E-modulus ( $E=9 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ ) is het ook zeer vormvast vergeleken met andere glazen of keramieken [6].

Om deze reden is gekozen voor Zerodur voor de grotere, eenvoudig te fabriceren onderdelen van het meetinstrument. De bewerking van Zerodur is echter tijdrovend zodat het niet is gebruikt voor de meer gecompliceerde onderdelen. De blokken  $B_{1,3}$ , de grondplaat, de draaiende delen van de draaitafel (tafels met verbindingbalken, luchtlagers) en de assen van de verplaatsingsopnemers zijn van dit materiaal gemaakt.

De meer gecompliceerde onderdelen, zoals de positionertafels, klemelementen, enz. (zwarte delen in figuur 5), zijn gemaakt van Invar omdat dit materiaal op bijna dezelfde manier als staal kan worden bewerkt.

## Fabricage

De glas-keramiekonderdelen zijn geslepen met diamantgereedschap. Er is gebruik gemaakt van vlak- en rond-slijpmachines, boor- en freesmachines, zoals die gebruikt worden bij het bewerken van glas en keramiek. Zerodur is een bros materiaal dat bij de bewerking met gebonden slijpmiddelen dezelfde eigenschappen als kwarts vertoont. Hoewel Zerodur veel minder hard is als kwartsglas zijn de "chipeffecten" tijdens het bewerken van dezelfde orde. Het is mogelijk Zerodur te slijpen met metaalgebonden slijpstenen, die echter aan de kanten van

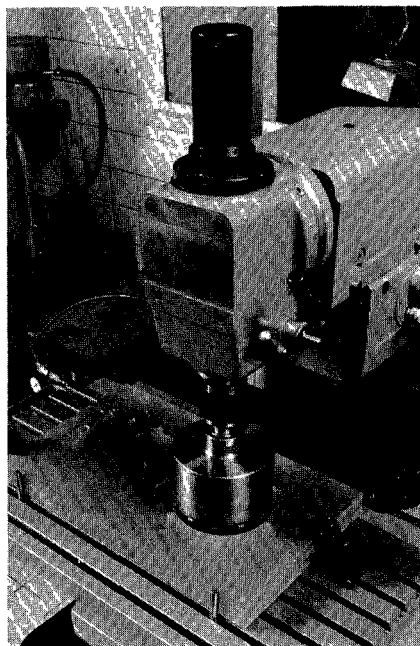


Figuur 5 Asferenmeetapparaat.

kleine facetten voorzien moeten worden om het "chip-effect" te vermijden. De specifieke energie van Zerodur is ongeveer  $8$  tot  $10 \text{J/mm}^3$ , hetgeen betekent dat de slijpkrachten klein kunnen zijn, vooral tijdens het slijpen met een kleine diepte-aanzet (circa  $10 \mu\text{m}$ ).

De figuren 6 en 7 tonen de basisplaat tijdens de bewerking op een freesmachine; in figuur 6 wordt de freesmachine gebruikt voor het boren van het gat voor de draaitafel met een diamantgeïmpregneerde boor. Figuur 7 toont de freesmachine uitgerust met een slijpkop voor hoge snelheden, waarmee gaten ten behoeve van de montage de eindbewerking krijgen; deze gaten worden gemaakt met een plaatsnauwkeurigheid van  $0,01 \text{mm}$ . De buitenkant van de grondplaat wordt geslepen met een metaalgebonden komschijf op dezelfde freesmachine. Tijdens het slijpen met losse korrels gedraagt Zerodur zich als een zacht glas, vergelijkbaar met kalkglazen. Ook

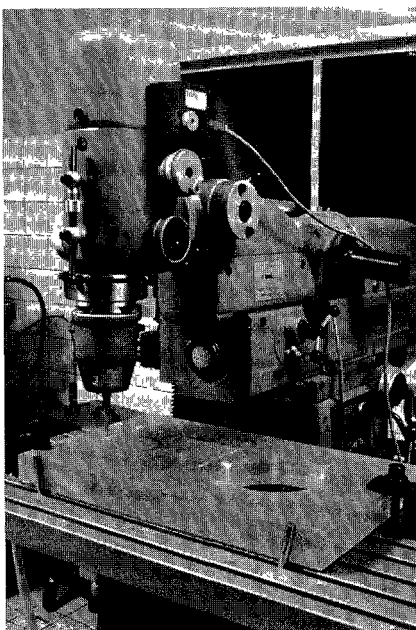
bij bewerkingen met losse korrels moet men kanten breken om 'chip-effecten' en krassen te voorkomen bij het bewerken van grote onderdelen zoals de grondplaat. Zoals bij andere optische materialen het geval is kan Zerodur optisch worden gepolijst.



Figuur 6 Het boren van Zerodur

### Ervaringen

De beschreven machine is nu enige jaren in gebruik. De constructie waarbij materialen met lage uitzettings-



Figuur 7 Het slijpen (met hoge slijpsnelheden) van Zerodur

coëfficiënt zijn gebruikt heeft bewezen veel stabielere te zijn dan een vergelijkbare constructie in metaal. De tijd, nodig voor opwarmen voordat met de metingen kan worden begonnen, bedraagt tien minuten. Alleen de lucht-lagers veroorzaken een temperatuurgraad- diënt gedurende het opstarten vanwege de expansie van de lucht. Deze temperatuurinvloed is echter binnen tien minuten gestabiliseerd.

Het hoge lichtniveau dat vaak toegepast wordt in meetkamers veroorzaakt een kleine temperatuurgradiënt in meetopstellingen. Bij het hierboven beschreven apparaat kon deze invloed niet worden vastgesteld. Er bestaat ook geen meetbare invloed veroorzaakt door de straling als gevolg van de lichaamstemperatuur van mensen die met of vlakbij deze apparatuur werken.

### Literatuur

- [1] High precision measurement of aspheric surfaces, J.G. Dil, W. Mesman and J.C. Driessen, SPIE Vol. 235. Aspheric Optics: Design, Manufacture, Testing, (Sira) (1980), 85-90.
- [2] Aspheric surfaces: design and optical advantages, J.J.M. Braat, Philips Technical Review, 41, 1983/84, no. 10, 289-296.
- [3] COLATH, a numerically controlled lathe for very high precision, T.G. Gijsbers, Philips Technical Review, 39, 1980, 229-244.
- [4] Optomechanics, an ultra-high-precision machining technique, J. Haisma and T.G. Gijsbers, Philips Technical Review, 41, 1983/84, no. 10, 286-289.
- [5] Fabrication, testing and application of highly accurate aspheric optical elements, J. Haisma, W. Mesman, J.M. Oomen and J.C. Wijn, Philips Technical Review, 41, 1983/84, no. 10, 296-303.
- [6] Dimensional stability of fused silica, Invar and ultra-low thermal expansion materials, J.W. Bethold, S.F. Jacobs and M.A. Norton, Metrologica 13, 1977, 9-16

## Normalisatie

### Nederland draagt internationaal secretariaat voor technische tekeningen over

Sinds de reorganisatie in 1973 van de internationale technische commissie ISO/TC "Technical drawings" heeft Nederland het internationale secretariaat verzorgd van de subcommissie ISO/TC 10/SC 1 "Technische tekeningen - Algemene principes". Eén van de belangrijke onderwerpen was de volledige herziening van de basisnorm voor het technisch tekenen: de internationale norm ISO 128 "Technical drawings - General principles of presentation" betreffende plaatsing van aanzichten, lijnsoorten, acering van doorsneden enzovoort. Ook vele andere onderwerpen zijn in behandeling geweest, dat tot nu toe heeft geresulteerd in de navolgende twaalf internationale normen.

- ISO 128 "Technical drawings - General principles of presentation";
- ISO 1302 "Technical drawings - Method of indicating surface texture on drawings";
- ISO 3098/1 "Technical drawings - Lettering - Part 1: Currently used characters";
- ISO 3098/2 "Technical drawings - Lettering - Part 2: Greek characters";
- ISO 3098/4 "Technical drawings - Lettering - Part 4: Cyrillic characters";
- ISO 5455 "Technical drawings - Scales";
- ISO 5457 "Technical drawings - Sizes and lay out of drawing sheets";
- ISO 6428 "Technical drawings - Requirements for microscopy";
- ISO 6433 "Technical drawings - Item references";
- ISO 7083 "Technical drawings - Symbols for geometrical tolerancing - Proportions and dimensions";
- ISO 7200 "Technical drawings - Title block";
- ISO 7573 "Technical drawings - Item lists".

Inlichtingen ir J. van Eik, secretaris afdeling Werktuigbouw NNI, telefoon (015) 611061, toestel 238