

Vervaardiging en metrologie van aluminium freeform-spiegels

TNO Industrie en Techniek heeft met de aanmaak van negen aluminium freeform-spiegels voor het zogeheten SCUBA-2 project een hoogstandje in vormnauwkeurigheid verricht. Samen met NLR en Precitech heeft TNO een betrouwbare methode ontwikkeld voor het aanmaken, meten en analyseren van complexe freeform-oppervlakken. De op een diamantdraaibank toegepaste 'slow tool servo'-techniek kan ook worden ingezet voor andere applicaties, zoals spuitgietmatrijzen voor optische componenten, en op andere materialen, zoals non-ferro-metalen en polymeren.

• **Bart van Venrooy en Ian Saunders** •

TNO Industrie en Techniek heeft aan het UK Astronomy Technology Center negen freeform-spiegels geleverd voor een nieuw submillimeter-instrument genaamd SCUBA-2, Submillimetre Common-User Bolometer Array, versie 2. Met een grotere gezichtshoek en een hogere *sky-background*-gevoeligheid kan deze ver-infraroodcamera duizend maal sneller een groot gebied van het heelal in kaart brengen dan zijn voorganger SCUBA. De eis van freeform-optiek komt voort uit het feit dat de beschikbare ruimte conventionele sferische optiek niet toestaat.

TNO had al diverse technologieën ontwikkeld voor de aanmaak en metrologie van vrijevorm-optiek en zijn ervaring op het gebied van mechanisch ontwerp en analyse hierop toegepast. Vanwege de verscheidenheid in vorm, afmeting en nauwkeurigheid heeft TNO de opdracht voor de negen spiegels verspreid uitgezet. Het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR) heeft de vijf grootste spiegels

(afmetingen groter dan 1 m² en massa meer dan 150 kg) aangemaakt en met de hand gepolijst. De behaalde vormnauwkeurigheid lag tussen 10 en 15 µm *peak-to-valley* en de ruwheid bedroeg circa 40 nm rms (root mean square). TNO heeft de vier kleinere, nauwkeurigere spiegels (met diameter tussen 300 en 700 mm) vervaardigd met behulp van een Precitech Nanoform 350 diamantdraaibank. De behaalde vormnauwkeurigheid lag tussen 4 en 6 µm *peak-to-valley* en de ruwheid bedroeg circa 10 nm rms.

Achtergrond

Het instrument SCUBA is ontwikkeld door het UK Astronomy Technology Center (UKATC) en maakt deel uit van de James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) op Mauna Kea, Hawaï; zie Figuur 1. De JCMT wordt gerund door Engeland, Canada en Nederland. Het originele SCUBA-instrument heeft verschillende doorbraken gerealiseerd in

FREEFORM-OPTIEK

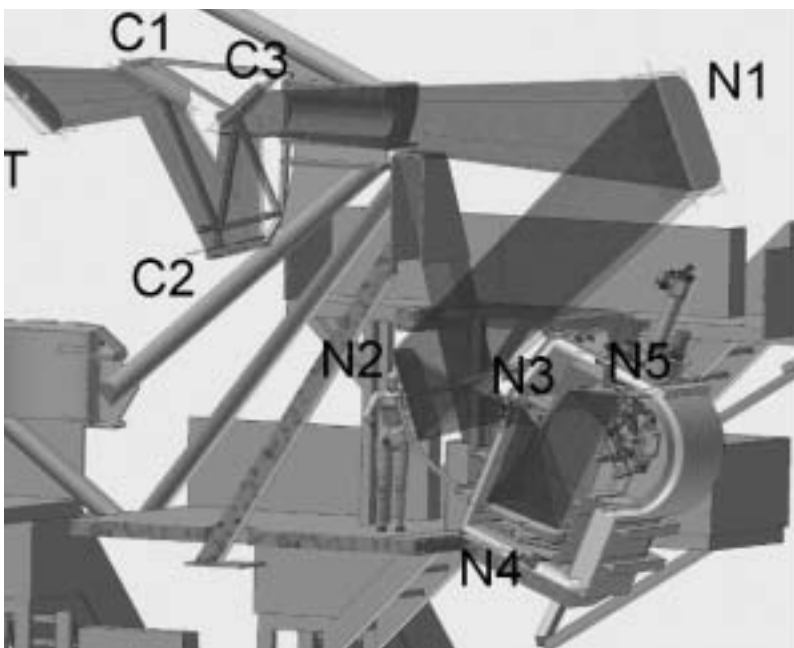


Figuur 1. Mauna Kea, Hawaï. (Foto: JCMT, Mauna Kea Observatory, Hawaï)

een voorheen onverkend golflengtegebied, maar is pijnlijk langzaam. Het nieuwe instrument SCUBA-2 zal krachtiger en gevoeliger zijn dan zijn voorganger dankzij verschillende technische innovaties. SCUBA-2 heeft honderd maal meer pixels, is duizend maal sneller en is het submillimeter-equivalent van een CCD-camera (charge-coupled device) bij optische en infraroodgolflengtes.

Freeform-spiegels

Het volle apertuur van de JCMT cassegrain-focus is 600 mm (in diameter). De apertuurverkleining van de telescoop moet aangepast zijn aan een realistisch uitvoerbare detectorarray-afmeting. Het gevolg is dat de optische elementen en optische weg vrij groot worden. Dit vormt een behoorlijke uitdaging, aangezien de ruimte waarin de telescoop roteert zeer beperkt is. Het optisch ontwerp van de UKATC (zie Figuur 2) benut daarom de voordelen van freeform-optiek: compactheid (minder optische elementen) en optimalisatie van de positionering van de optische elementen.

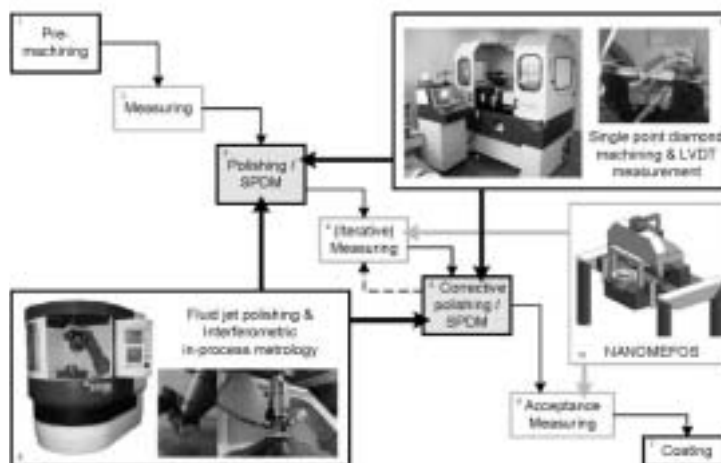


Figuur 2. Spiegeloriëntatie voor het SCUBA-2 instrument. (Foto: JCMT, Mauna Kea Observatory, Hawaï)

Procesketen

Het gebruik van freeform-spiegels leverde een verscheidenheid aan uitdagingen op in de ontwikkeling van het SCUBA-2 instrument. Tegenover de hiervoor genoemde voordelen in vergelijking tot conventionele optiek staat dat freeform-optiek uitzonderlijk moeilijk is te fabriceren en meten. De opto-mechanische business unit van TNO Industrie en Techniek heeft zich ingespannen voor het ontwikkelen van technologieën om dergelijke freeform-optiek te fabriceren en meten. Figuur 3 toont de procesketen van TNO voor het fabriceren van freeform-optiek.

Als gevolg van de complexiteit van moderne hightech-producten is het moeilijk om alle stappen in een dergelijke keten te controleren. De focus van TNO ligt op de processtappen 3, 4 en 5. TNO ziet toekomst in geïntegreerde systemen voor fabricage en metrologie, ook wel bekend als 'on-machine' metrologie.



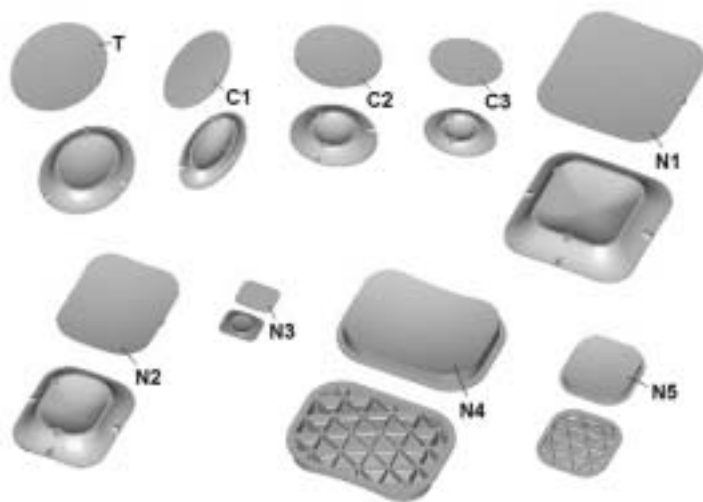
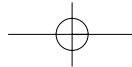
(SPDM = Single Point Diamond Machining; raster flycutting = slagkopfrezen; NANOMEFOS = Nanometer Accuracy Non-Contact Measurement of Freeform Optical Surfaces)

Figuur 3. De freeform-procesketen van TNO.

Ontwerp en analyse

Het ontwerp- en het productieproces zijn gelijktijdig uitgevoerd, gezien het feit dat beide sterk van elkaar afhankelijk zijn. De SCUBA-2 spiegelset bestaat in totaal uit negen freeform-spiegels, waarbij de spiegels N1 en N4 groter zijn dan 1 m² (zie Figuur 4). De spiegels N4 en N5 hebben een uitgeholde achterzijde, dit om de warmteoverdracht bij de afkoeling naar cryogene werkteemperatuur te versnellen.

Elk spiegeloppervlak wordt beschreven door een vierde-ordepolynoom met twaalf coëfficiënten in de vorm van



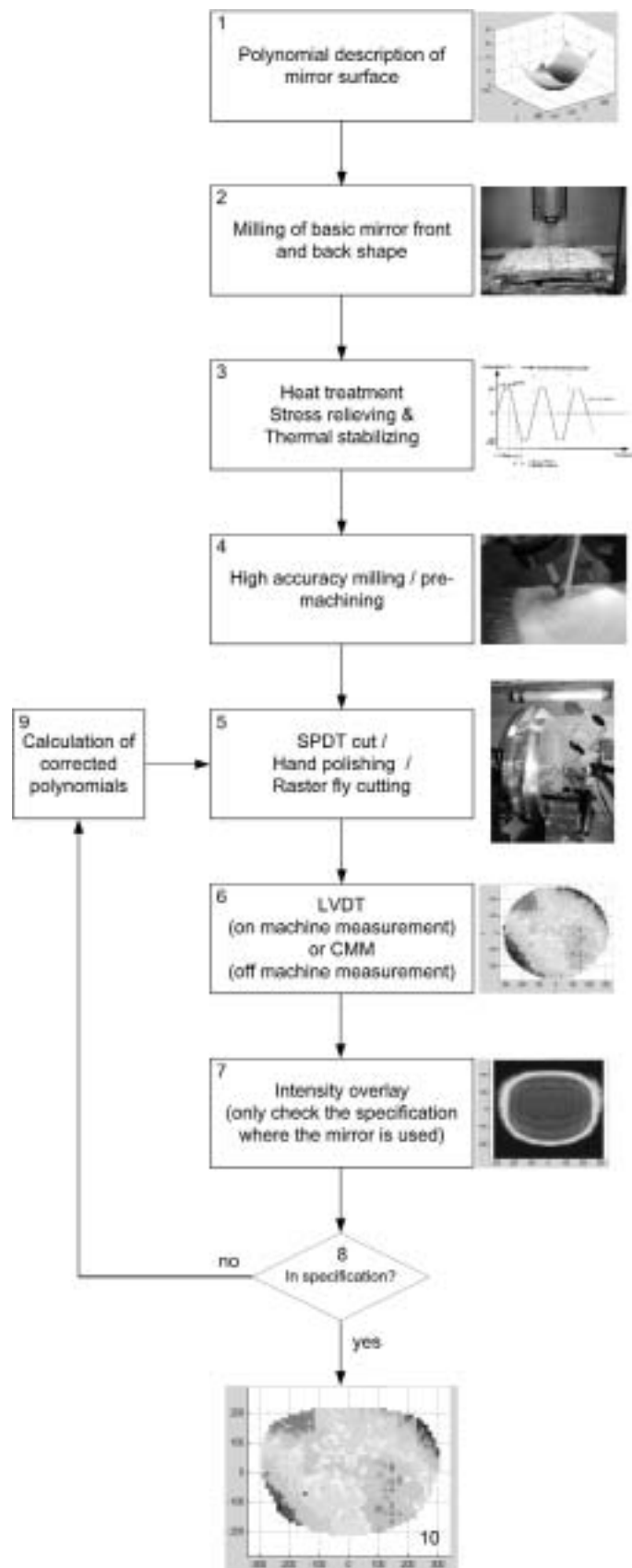
Figuur 4. De spiegelset voor SCUBA-2.

$z = f(x,y)$. De vereiste vormnauwkeurigheid voor deze oppervlakken ligt tussen de 8 en 20 μm peak-to-valley, afhankelijk van de afmeting van de spiegel. De specificatie van de vereiste oppervlakteruwheid was 1 μm over het totale oppervlak, met in het midden een vlak van rond 40 mm met een oppervlakteruwheid tussen de 20 en 40 nm rms voor uitlijndoeleinden. De spiegels N3, N4, en N5 komen in een cryostaat, die wordt afgekoeld naar 4 K. Deze spiegels worden bij kamertemperatuur (20 °C) gefabriceerd. Om de vorm van het oppervlak te behouden bij 4 K is berekend wat bij deze temperatuur de krimp van de spiegel is (0,414%). De nominale vorm van de spiegel is bij kamertemperatuur dus anders dan bij de werkt temperatuur van 4 K.

Een andere belangrijke ontwerpfactor was de oriëntatie van de spiegels. Zeker de grote spiegels vervormen onder invloed van de zwaartekracht. De vervormingen liggen in dezelfde orde grootte als de vereiste vormnauwkeurigheid. Met behulp van eindige-elementenberekeningen is geverifieerd wat de exacte vervorming is. Deze is vervolgens verrekend met de fabricagefouten. Tevens was de oriëntatie van belang bij het meten van de spiegels. De diamantgedraaide spiegels zijn in verticale oriëntatie bewerkt en horizontaal gemeten op een CMM (Coordinate Measurement Machine). In het algemeen geldt dat de uiteindelijke nauwkeurigheid van de spiegels afhangt van de bewerkingsnauwkeurigheid, de meetnauwkeurigheid en hun oriëntatie in de telescoop.

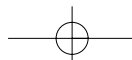
Productie

Figuur 5 is een vereenvoudigde weergave van het productieproces. Alle spiegels zijn vervaardigd uit gesmeed aluminium AL6061-T651. De blokken aluminium zijn voorgefreest, waarna ze een warmtebehandeling en een cryogene temperatuurcyclus hebben ondergaan. Dit om eventuele spanningen in het materiaal tengevolge van de machinale bewerkingen te



(SPDT = Single Point Diamond Turning)

Figuur 5. Het productieproces van freeform-spiegels.



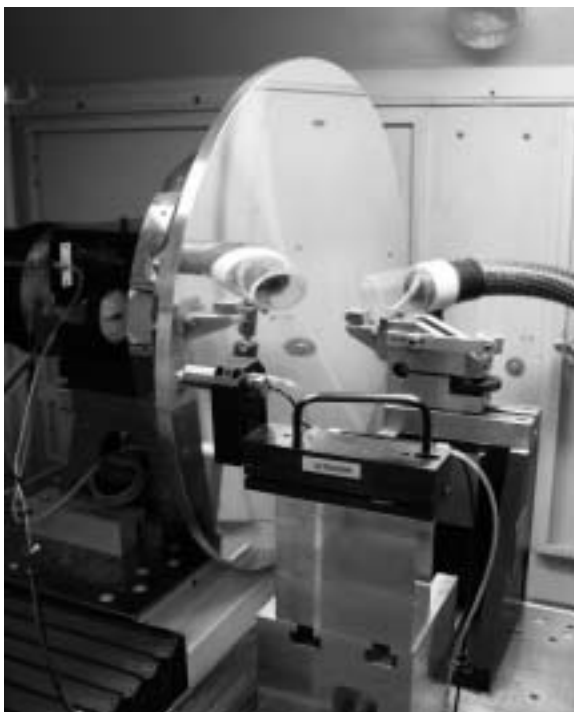
FREEFORM-OPTIEK

eliminieren en het materiaal thermisch te stabiliseren. De uiteindelijke spiegeloppervlakken zijn hierna door middel van handpolijsten of diamantdraaien op specificatie gebracht.

Vormmeting

Alle gecertificeerde metingen aan de spiegels zijn uitgevoerd op een CMM. Om de doorlooptijd en de communicatie te optimaliseren heeft TNO een Matlab-programma ontwikkeld dat xyz-data kan produceren van verschillende metrologiesystemen. Met dit programma kunnen de meetdata worden geanalyseerd en eventuele vormfouten worden gecorrigeerd. Het gecorrigeerde besturingsprogramma wordt vervolgens gebruikt om het oppervlak opnieuw te bewerken.

Voor het diamantdraaien is in samenwerking met machinefabrikant Precitech een 'on-machine' metrologiesysteem ontwikkeld op basis van een elektronische lineaire verplaatsingsopnemer (Lineaire Variabele Differentiële Transformator, LVDT); zie Figuur 6. Alhoewel dit systeem nog niet gecertificeerd was voor het leveren van de uiteindelijke meetresultaten, gaf het een betrouwbare indicatie of de spiegel aan de vereiste vormspecificaties voldeed.

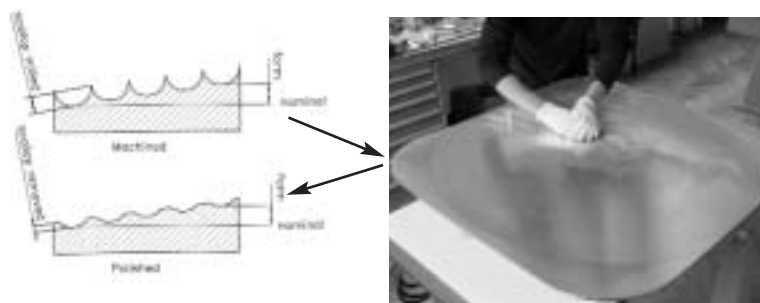


Figuur 6. Het LVDT-meetsysteem.

Handpolijsten

Als voorbeeld voor het handpolijstproces kan de N4 dienen. De afmetingen van deze spiegel zijn 1170 x 880 mm, bij een massa van 55 kg. Handpolijsten hangt sterk af van de voor-

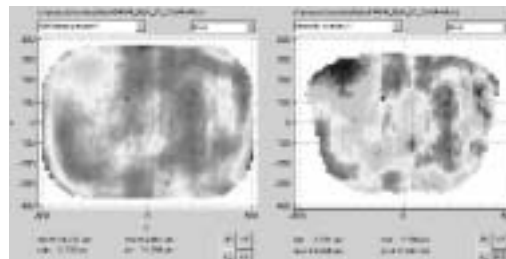
bewerking van het oppervlak. Met een 5-assige freesmachine en een radiuskopfrees werd het oppervlak voorgefreesd. De spiegelvorm had na deze bewerking een nominale nauwkeurigheid van circa 20 μm met een schulphoogte van ongeveer 50 mm (zie Figuur 7).



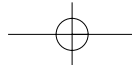
Figuur 7. Handpolijsten van een geschulpt oppervlak.

Bij handpolijsten wordt het eindresultaat hoofdzakelijk bepaald door het vakmanschap van de persoon die het werk uitvoert. Tijdens het proces worden de schulpen zodanig gepolijst dat ze bijna zijn verdwenen. Hierna volgt een iteratief proces van meten en polijsten tot de gewenste specificatie is gehaald. Op deze manier kunnen waarden worden gehaald van 10-15 μm peak-to-valley met een ruwheid van 40 tot 50 nm rms.

Het resultaat voor spiegel N4 geeft aan welke nauwkeurigheid kan worden gehaald op dergelijke grote freeform-spiegels. Figuur 8 toont de analyse van een oppervlak na meting op de CMM. Over de wolk van meetpunten wordt het effectieve oppervlak van de optische bundel geprojecteerd. Daarop wordt vervolgens een correctie voor de gemeten hoogteafwijkingen toegepast. Het gecorrigeerde oppervlak wordt met nieuwe polynomen beschreven en dat wordt gebruikt om het oppervlak na te draaien.

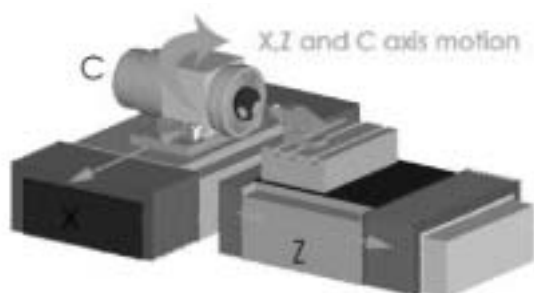


Figuur 8. CMM-vormmeting van spiegel N4. De 'kleuren' geven hoogteaflwijkingen aan ten opzichte van het nominale oppervlak. Links de meting aan het gehele oppervlak (peak-to-valley 21,4 μm) en rechts aan het effectieve oppervlak voor de optische bundel (peak-to-valley 11,1 μm).



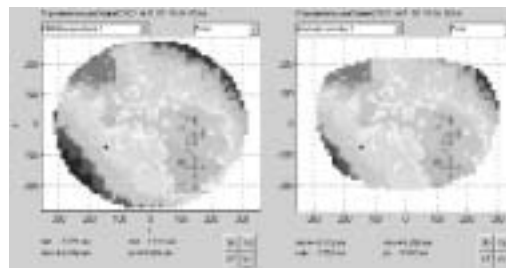
Diamantdraaien met slow tool servo

Bij TNO zijn de spiegels gefabriceerd op een Precitech Nanoform 350 diamantdraaibank. Deze machine bestaat uit twee hydrostatisch gelagerde sledes (X, Z) in T-configuratie, met op de X-slede een heavy duty-luchtlagerspindel die als C-as functioneert (zie Figuur 9).



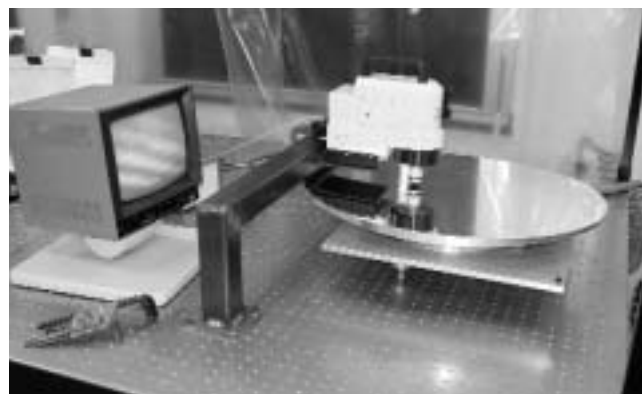
Figuur 9. Configuratie van de diamantdraaibank.

De assen worden aangestuurd door een Precitech Ultrath III CNC-besturing. Een gemodificeerde spindelophanging zorgt ervoor dat spiegels tot een diameter van 680 mm kunnen worden gedraaid. Verder zijn de spindelaandrijving en positioneringsbesturing gemodificeerd voor meer stijfheid vanwege de afmetingen van de te bewerken spiegels. Door de drie assen gelijktijdig aan te sturen ontstaat een servobeweging van de beitel (slow tool servo). Hiermee kunnen niet-rotatiesymmetrische oppervlakken worden bewerkt. De spiegels worden gemonteerd op een speciale interfaceplaat die direct op de spindel gemonteerd zit. Deze interface is zodanig ontworpen dat eventuele spanning niet naar het spiegelvlak wordt overgedragen. De besturingsprogramma's zijn gegenereerd met behulp van Diffsys-software. Vanwege de omvang van de spiegels kunnen de besturingsbestanden meer dan 100 Mb groot zijn voor een nadraaicyclus. Er kan worden gekozen voor verschillende beitelradii afhankelijk van de gewenste oppervlakteruwheid. Het voorgefreesde oppervlak wordt eerst voorgedraaid om het geschulpte oppervlak schoon te draaien. Hierna wordt nagedraaid om de uiteindelijke vormnauwkeurigheid en oppervlakteruwheid te verkrijgen. Voor spiegel C2 (650 mm diameter en 32 kg) duurde een nadraaicyclus ongeveer 18 uur. Met deze methode kunnen waarden worden gehaald van $<6 \mu\text{m}$ peak-to-valley met een ruwheid van 10 tot 15 nm rms. Met het LVDT-systeem wordt een raster van punten gescand over het spiegeloppervlak, waarna de data kunnen worden geanalyseerd en het besturingsprogramma kan worden gecorrigeerd. Zie Figuur 10.



Figuur 10. Vormmeting van spiegel C2 met behulp van het LVDT-systeem. Links het gehele oppervlak (peak-to-valley $6,0 \mu\text{m}$), rechts het effectieve oppervlak (peak-to-valley $5,7 \mu\text{m}$).

Figuur 11 ten slotte toont een aangepaste opstelling met Wyko RST 500 profielmeter, waarmee de oppervlakteruwheid van de spiegels is gemeten.



Figuur 11. Oppervlakteruwheidsmeting met een Wyko RST 500.

Verantwoording

Dit artikel is deels gebaseerd op:

Ian J. Saunders, Leo Ploeg, Michiel Dorrepaal, Bart van Venrooij, "Fabrication and Metrology of Freeform Aluminum Mirrors for the SCUBA-2 Instrument", Optics & Photonics, 31 July - 4 August 2005, San Diego, co-located with the SPIE 50th Annual Meeting.

Auteursnoot

De auteurs zijn werkzaam bij TNO Industrie en Techniek, business unit Opto-Mechanische Instrumentatie, afdeling Precisie Mechanica/Optica.

Informatie

jj.korpershoek@tno.nl
bart.vanvenrooy@tno.nl
www.tno.nl

