

Vervaardiging en Metrologie van Aluminium "Freeform" Spiegels voor het SCUBA-2 Instrument

Bart van Venrooy • Ian Saunders TNO • Industrie en Techniek •
Opto-Mechanical Instrumentatie • Afdeling Precisie Mechanica/Optica

Inleiding

TNO Industrie en Techniek is een contract aangegaan met het UK Astronomy Technology Center om negen freeform spiegels te leveren voor een nieuw sub-millimeter instrument genaamd SCUBA-2. Met een groter field of view en een hogere sky-background gevoeligheid kan SCUBA-2 1000 maal sneller een groot gebied van het heelal in kaart brengen dan zijn voorganger. De eis voor freeform optiek komt voort uit het feit dat de beschikbare ruimte conventionele sferische optiek niet toestaat. TNO, die diverse technologieën heeft ontwikkeld voor de maak en metrologie voor vrijvorm optiek (hierna genoemd als freeform optiek of freeform spiegel), heeft zijn ervaring op het gebied van mechanisch ontwerp en analyseren hierop toegepast.

Als gevolg van de verscheidenheid aan vorm, afmeting en nauwkeurigheid heeft TNO de opdracht voor de negen spiegels verspreid over verschillende organisaties. Het Nationaal Lucht en Ruimtevaart Laboratorium (NLR) heeft de vijf grootste spiegels aangemaakt en met de hand gepolijst (afmetingen groter dan 1 m² en gewicht meer dan 150 kg). Gehaalde vormnauwkeurigheid tussen 10 en 15 micrometer peak to valley (P-V) en ruwheid circa 40 nanometer RMS.

TNO heeft de 4 kleinere en nauwkeurigere spiegels (afmetingen tussen 300 en 700 mm diameter) vervaardigd met behulp van een Precitech Nanoform 350 diamantdraaibank. Gehaalde vormnauwkeurigheid tussen 4 en 6 micrometer peak to valley (P-V) en ruwheid circa 10 nanometer RMS.

Achtergrond SCUBA en JCMT

Het instrument SCUBA is ontwikkeld door de UKATC (UK Astronomy and Technology Center) en maakt deel uit van de JCMT (James Clerk Maxwell Telescope), gelocaliseerd op Mauna Kea in Hawaï. De JCMT wordt gerund door Engeland, Canada en Nederland. Het originele SCUBA instrument heeft verschillende doorbraken gerealiseerd in een voorheen onverkend golflengte gebied maar is pijnlijk langzaam. Het nieuwe SCUBA-2 instrument zal krachtiger en gevoeliger zijn dan zijn voorganger in combinatie met verschil-

lende nieuwe technische innovaties. SCUBA-2 heeft 100 keer meer pixels, is 1000 maal sneller en is het submillimeter equivalent van een CCD (charged coupled device) camera bij optisch/infrarood golflengtes.

"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 array afmeting. Het gevolg is dat de optische elementen en optische weg vrij groot worden. Dit vormt een behoorlijke uitdaging aangezien de ruimte zeer beperkt is waarin de telescoop roteert. Het optisch ontwerp van de UKATC gebruikt hiervoor de voordelen van freeform optiek: compactheid (minder optische elementen) en optimalisatie van de positionering van de optische elementen.

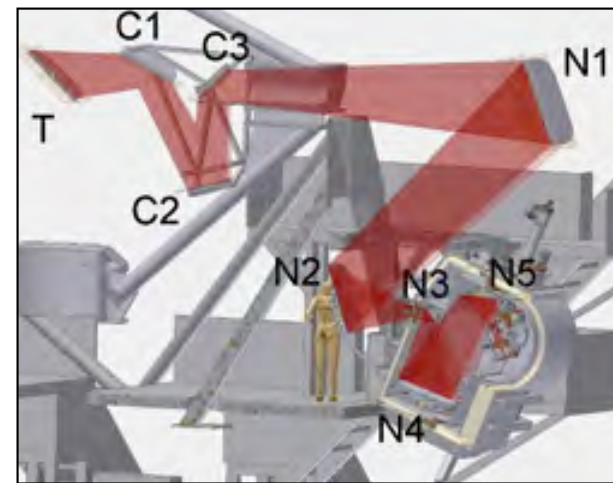


Bart van Venrooy

Werkzaam bij TNO Industrie en Techniek sinds 2000. Research Instrumentmaker en operator van diamantdraaibank bij de afdeling Optische Vervaardiging. Vervaardiging van hoogwaardige optische componenten tbv diverse Opto-mechanische instrumenten. Onderzoek en ontwikkeling van het productieproces mbt diamantdraaien en metrologie



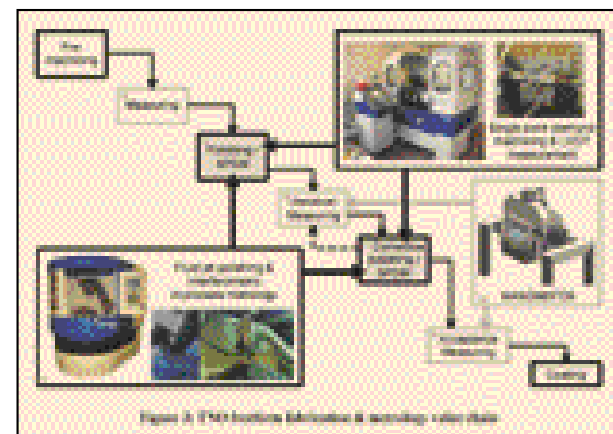
Figuur 1: Mauna Kea, Hawaii (Image courtesy of the James Clerk Maxwell Telescope, Mauna Kea Observatory, Hawaii)



Figuur 2: Spiegel oriëntatie voor het SCUBA-2 instrument

TNO Proces keten freeform Optiek

Het gebruik van freeform spiegels leverde een verscheidenheid aan uitdagingen op in de ontwikkeling van het SCUBA-2 instrument. Ondanks de hiervoor genoemde voordelen van freeform optiek in vergelijking tot conventionele optiek, is freeform optiek uitzonderlijk moeilijk te fabriceren en te meten. De opto-mechanische business unit van TNO Industrie en Techniek heeft een significante inspanning gedaan om technologieën te ontwikkelen om dergelijke freeform optieken te fabriceren en te meten. Figuur 3 toont de

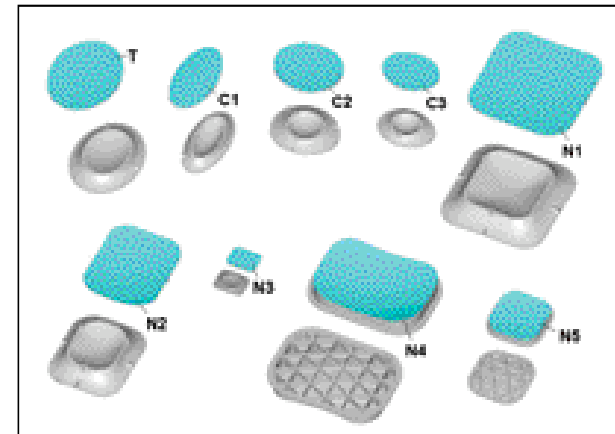


Figuur 3: TNO freeform proces keten

proces keten van TNO voor het fabriceren van freeform optiek. Als gevolg van de complexiteit van moderne hi-tech producten is het moeilijk om alle stappen in een dergelijke keten te controleren. Het focus van TNO ligt op de proces stappen 3, 4 en 5. TNO gelooft sterk dat de toekomst ligt in geïntegreerde systemen voor fabricatie en metrologie, ook wel bekend als “on-machine” metrologie.

Ontwerp, Analyse

Het ontwerp- en productieproces zijn gelijktijdig uitgevoerd gezien het feit dat beide sterk van elkaar afhankelijk zijn. De SCUBA-2 spiegel set bestaat in totaal uit 9 freeform spiegels. Figuur 4 laat het uiteindelijke ontwerp zien waarbij de spiegels N1 en N4 afmetingen hebben van groter dan 1 m². Zeven spiegels hebben een dubbel boog achterzijde. De N4 en N5 spiegel hebben een uitgekamerde achterzijde, dit om de overdracht van warmte bij de afkoeling naar cryogene werkteperatuur te versnellen. Elk spiegeloppervlak wordt beschreven door een vierde orde polynoom met 12 coëfficiënten in de vorm van $z=f(x,y)$. De vereiste vormnauwkeurigheid voor deze oppervlakken ligt tussen de 8 en 20µm P-V afhankelijk van de afmeting van de spiegel. De vereiste oppervlakteruwheid specificatie was 1µm (micron) over het totale oppervlak met in het midden een vlak van rond 40 mm met een oppervlakteruwheid tussen de 20 en 40nm RMS voor uitlijn doeleinden. De N3, N4, en N5 spiegel worden geplaatst in een

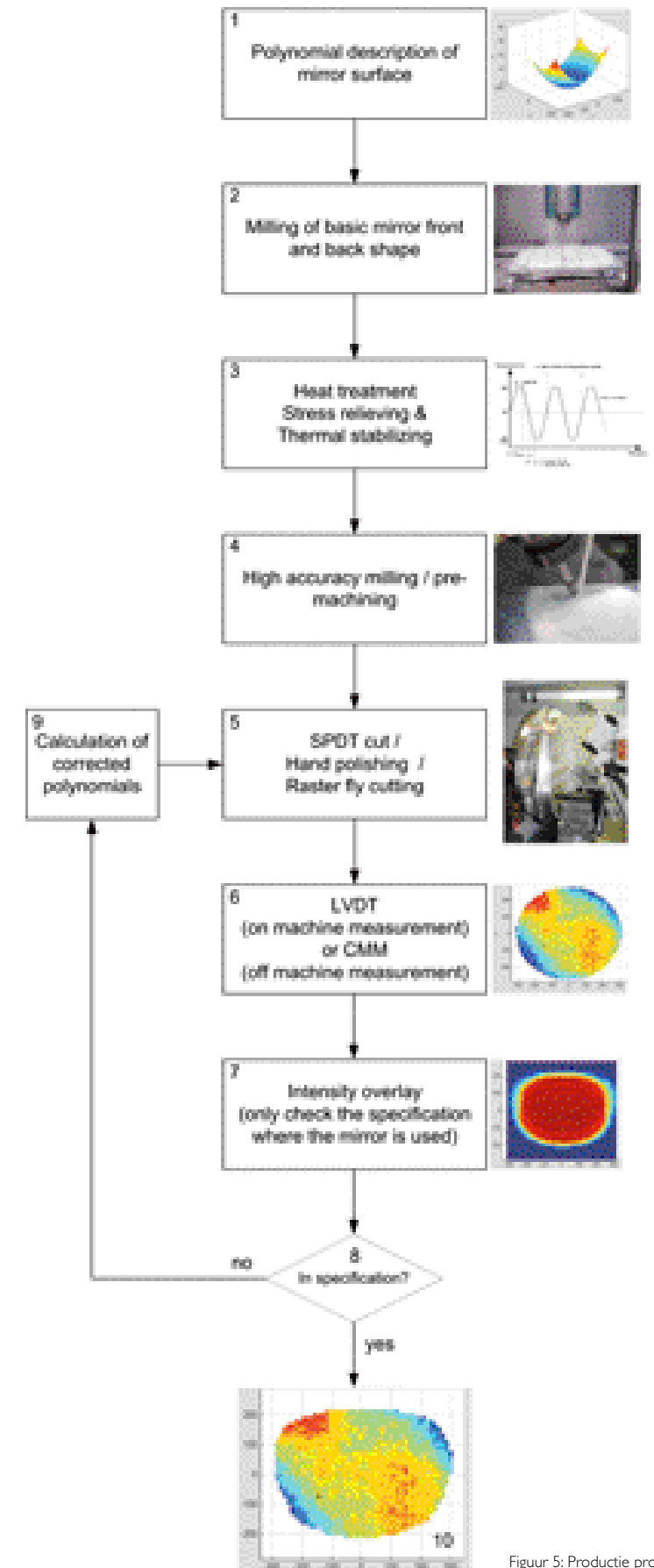


Figuur 4: SCUBA-2 spiegel set

cryostaat die afgekoeld wordt naar 4 Kelvin. Deze spiegels worden bij kamertemperatuur (20 graden Celsius) gefabriceerd. Om de vorm van het oppervlak te behouden bij 4 Kelvin is berekend wat de krimp (0,414%) van de spiegel is bij deze temperatuur. De nominale vorm van de spiegel is bij kamertemperatuur dus anders dan bij de werkteperatuur van 4 Kelvin. Een ander belangrijke ontwerfactor was de oriëntatie van de spiegels. Zeker de grote spiegels vervormen onder invloed van de zwaartekracht en hun eigen gewicht. De deflectiewaardes lagen in dezelfde orde grootte als de toegestane vormnauwkeurigheid. Met behulp van EEM (Eindige Elementen Methode) is geverifieerd wat de exacte vervorming is. Deze is vervolgens gecorrigeerd ten opzichte van de fabricatie fouten. Tevens was dit van belang voor 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 kan gezegd worden dat de uiteindelijke nauwkeurigheid van de spiegels af hangt van de bewerkingsnauwkeurigheid, meetnauwkeurigheid en de uiteindelijke oriëntatie van de spiegels in de telescoop.

Productie

In figuur 5 is een vereenvoudigde uitleg te zien van het productie proces. Alle spiegels zijn vervaardigd uit gesmeed aluminium AL6061-T651. Deze blokken zijn voorgefreest waarna ze een warmtebehandeling en een cryogene temperatuurcyclus hebben ondergaan. Dit om eventuele spanningen in het materiaal ten gevolge van de machinale bewerkingen te elimineren en te stabiliseren. De uiteindelijke spiegel oppervlakken zijn hierna door middel van handpolijsten of diamantdraaien op specificatie gebracht. Alle gecertificeerde metingen van de spiegels zijn uitgevoerd op een CMM. Om de doorlooptijd en de communicatie te optimaliseren heeft TNO een



Figuur 5: Productie proces

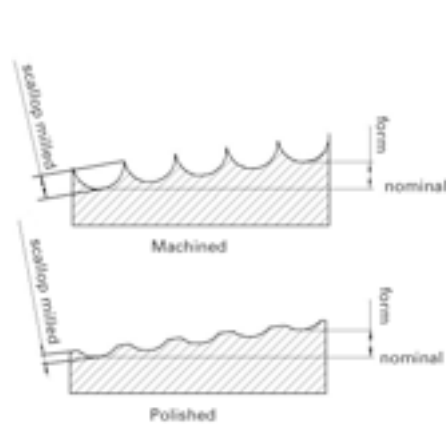
Matlab programma ontwikkeld welke XYZ data kan produceren van verschillende metrologiesystemen. Met dit programma kan de meetdata geanalyseerd worden en eventuele vormfouten worden gecorrigeerd. Deze gecorrigeerde data wordt vervolgens gebruikt om het oppervlak opnieuw te bewerken. Voor het diamantdraaien is in samenwerking met de machinefabrikant Precitech, een "on-machine" metrologiesysteem op basis van een elektronische lineaire verplaatsings opnemer (Lineaire Variabele Differentiële Transformator, LVDT) ontwikkeld. Alhoewel dit systeem nog

niet gecertificeerd was om de uiteindelijke meetresultaten te leveren, gaf het een betrouwbare indicatie of de spiegel aan de veraste vormspecificaties voldeed.

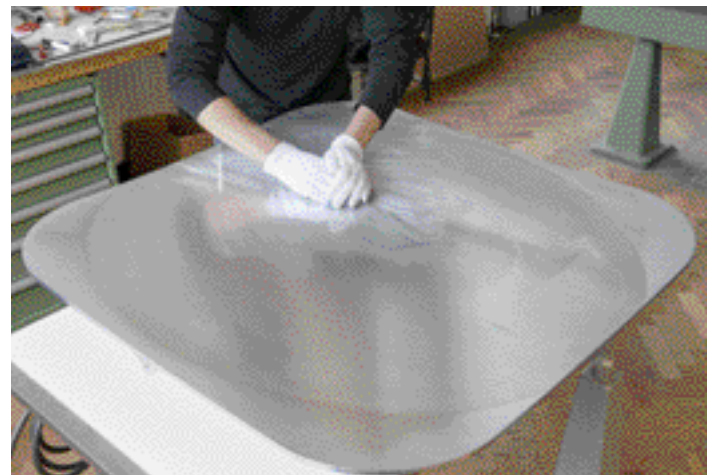
Handpolijsten

Als voorbeeld voor het handpolijst proces nemen we de N4. De afmetingen van deze spiegel zijn 1170x880 mm met een gewicht van 55 kg. Handpolijsten hangt sterk af van de voorbereiding van het oppervlak. Met een 5-assige freesmachine en een radiuskopfrees wordt het oppervlak voorgefreesd. De spiegelvorm had na deze bewerking een

nominale nauwkeurigheid van circa $20\mu\text{m}$ met een schulphoogte van ongeveer $50\mu\text{m}$. (zie figuur 6). Bij handpolijsten wordt het eindresultaat hoofdzakelijk bepaald door het vakmanschap van de persoon die het werk uitvoert. Tijdens het proces worden de schulpen zodanig weggepolijst totdat ze bijna verdwenen zijn. Hierna volgt een iteratief proces van meten en polijsten tot de gewenste specificatie is gehaald. Op deze manier kunnen waarden gehaald worden van $10\text{-}15\mu\text{m}$ P-V met een ruwheid van 40 tot 50nm RMS. Het resultaat van de N4 spiegel geeft aan welke



Figuur 6: Handpolijsten van een geschulpt oppervlak



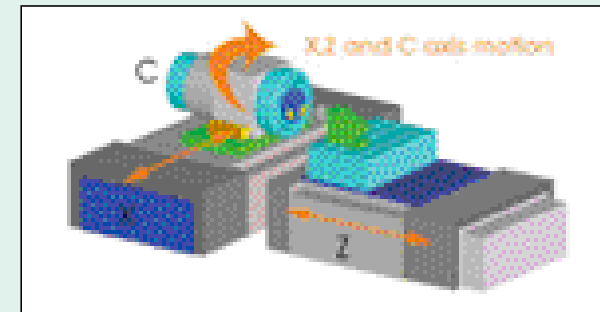
nauwkeurigheid gehaald kan worden op dergelijke grote freeform spiegels. In figuur 7 is de analyse te zien van een oppervlak na een meting op de CMM. De wolk van meetpunten wordt vergele-

ken met het effectieve oppervlak van de optische bundel die op het spiegeloppervlak valt. De meting is gedaan over het totale oppervlak van de spiegel waarna een intensiteit analyse is gedaan.

Diamantdraaien met Slow Tool Servo

De machine waarop bij TNO de spiegels zijn gefabriceerd is een Precitech Nanoform 350 diamantdraaibank. De machine bestaat uit 2 hydrostatisch gelagerde sledes (X,Z) in T-configuratie met op de X-slede een heavyduty lucht-lager spindel welke als C-as functioneert (zie figuur 8). De assen worden aangestuurd door een Precitech Ultrathin III CNC besturing.

Een gemodificeerde spindelophanging zorgt ervoor dat spiegels tot een diameter van 680 mm gedraaid kunnen worden. Verder zijn de spindelaandrijving en positioneringscontrole gemodificeerd voor meer stijfheid vanwege de afmetingen van de te bewerken spiegels. Door de 3 assen gelijktijdig aan te sturen



Figuur 8. Configuratie Slow Tool Servo

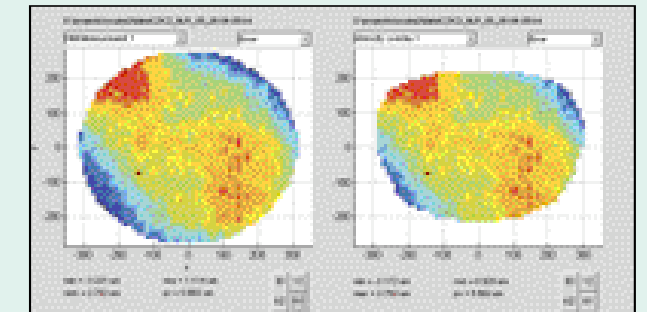
ontstaat een servo beweging van de beitel (Slow Tool Servo). Hiermee kunnen niet-rotatiesymmetrische oppervlakken bewerkt worden. De spiegels worden gemonteerd op een speciale interface plaat die direct op de spindel gemonteerd zit. Deze interface is zodanig ontworpen dat eventuele spanning niet naar het spiegelvlak wordt getransformeerd. De besturingsprogramma's zijn gegenereerd met behulp van Diffsys software. Door de grootte van de spiegels kunnen de besturingsbestanden meer dan 100 MB groot zijn voor een nadraai cyclus. Er kan gekozen worden voor verschillende beitel radii afhankelijk van de gewenste oppervlakterutheid. Het voorgefreesde oppervlak wordt eerst voorgedraaid om het geschulpte oppervlak schoon te draaien. Hierna wordt nagedraaid om de uiteindelijk vormnauwkeurigheid en oppervlakte ruwheid te verkrijgen. Voor de C2 spiegel (650 mm diameter en 32 kg) duurde een nadraai cyclus ongeveer 18 uur. Met deze methode kunnen waarden gehaald worden van $<6\mu\text{m}$ P-V met een ruwheid van 10 tot 15nm RMS voor de C2 spiegel. Met het LVDT systeem wordt een raster van punten gescand over het spiegel oppervlak waarna deze data geanalyseerd en gecorrigeerd kan worden (zie figuur 9). Figuur 10 laat de aangepaste WYKO 500 RST profielmeter opstelling zien waarmee de oppervlakterutheid van de spiegels is gemeten.

Conclusie

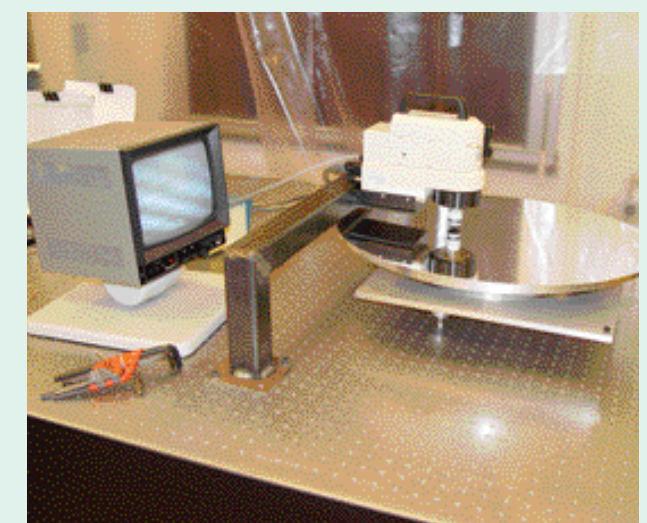
Met de aanmaak van 9 freeform spiegels voor het SCUBA-2 project heeft TNO een significante ervaring opgedaan. Samen met het NLR en Precitech heeft TNO een betrouwbare methode ontwikkeld waarmee complexe freeform oppervlakken aangemaakt, gemeten en geanalyseerd kunnen worden.

De "slow tool servo" techniek die op de diamantdraaibank is toegepast kan voor diverse andere interessante toepassingen worden ingezet. Tevens kan deze techniek op verschillende soorten materialen worden toegepast. ♦

Voor meer informatie: www.tno.nl Of email: jj.korpershoek@tno.nl of bart.vanvenrooy@tno.nl



Figuur 9: LVDT vormmeting met intensiteit analyse C2 spiegel



Figuur 10. Oppervlakterutheid meting met een Wyko RST500