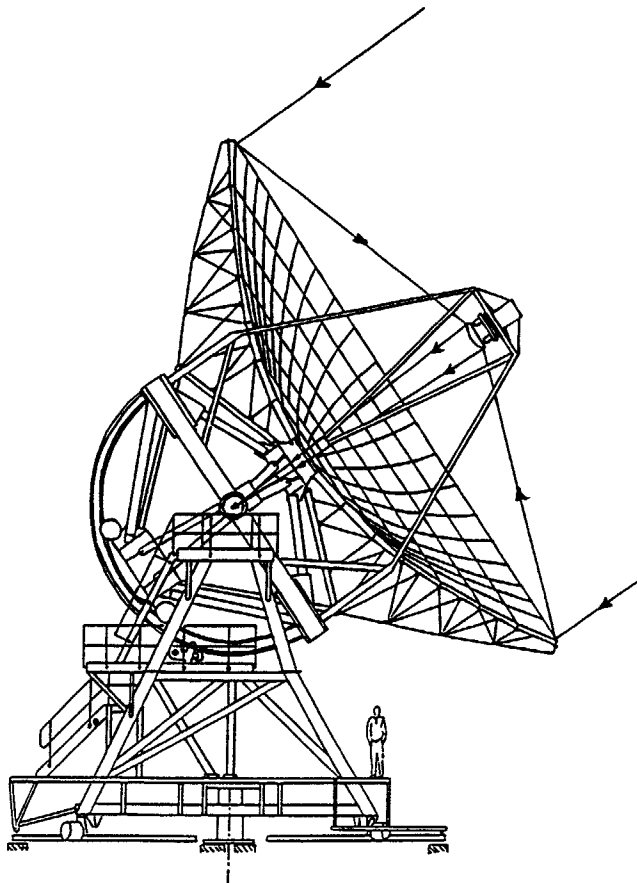


Lichtgewicht kantelspiegel voor telescoop



Figuur 1 Straling uit het heelal wordt door de parabolische hoofdspiegel gefocussieerd. Voor het focus van de hoofdspiegel staat de bolle secundaire spiegel die de straling kaatst naar de waarnemingsinstrumenten achter de hoofdspiegel. Daartoe is een gat uitgespaard in het midden van de hoofdspiegel.

Door een snelle kleine kanteling van de secundaire spiegel kan afwisselend naar en naast het te bestuderen object worden gekeken. Het eerste beeld bevat informatie met ruis, het tweede beeld bevat alleen ruis. Door beide beelden van elkaar "af te trekken" ontstaat een scherper beeld.

Dr. ir. J. Verkerk, Werkplaats Fysica, Rijks Universiteit te Utrecht.

Op 27 april 1987 werd op de meer dan 4000 m hoge vulkaan Mauna Kea op Hawaï de grote Brits-Nederlandse James Clerck Maxwell-telescoop in gebruik genomen. De telescoop is ontworpen voor het bestuderen van straling in submillimeter gebied (golflengten van 0,3 mm en langer). De golflengte is vrij klein, zodat hoge eisen worden gesteld aan de vormnauwkeurigheid van de spiegels.

Een belangrijk onderdeel is de secundaire spiegel die in Utrecht is ontworpen en gefabriceerd. Doordat de 750 mm grote secundaire spiegel een snelle kantelbeweging kan uitvoeren is zij uniek in de wereld, en kunnen door de daaraan gekoppelde beeldverwerking bijzondere waarnemingsresultaten worden behaald.

De Maxwell-telescoop

De telescoop dankt zijn naam aan de grondlegger van de elektromagnetische theorie van licht- en radiogolven. De telescoop bestaat uit twee spiegels, een hoofdspiegel van 15 meter diameter en een secundaire spiegel van 0,75 meter. De telescoop is ontworpen voor het bestuderen van golflengten rondom één millimeter die informatie kunnen bevatten over het ontstaan van sterren, doordat wel millimeterstraling wordt uitgestraald, maar nog geen licht.

De telescoop lijkt op een radiotelescoop. Sub-millimeterstraling is niet eenvoudig waar te nemen, de golflengte is nog vrij klein, zodat hoge eisen worden gesteld aan de vormnauwkeurigheid van het spiegeloppervlak. Dat moet veel nauwkeuriger bewerkt worden dan dat van een radiotelescoop. Maar om bij deze golflengten nog een scherpe afbeelding te krijgen is het nodig dat het spiegelop-

pervlak groot is. Hoe langer de golflengte, des te groter moet de telescoop zijn om nog "scherp" te kunnen zien.

Deze straling wordt voornamelijk door waterdamp in de atmosfeer geabsorbeerd, zodat de waarnemingen van een zo groot mogelijke hoogte moeten worden gedaan zoveel mogelijk boven de atmosferische waterdamp. Zulke grote telescopen kunnen (nog) niet in de ruimte worden gebracht, zodat ze op een zo hoog mogelijke berg worden geplaatst.

De werking van de telescoop blijkt uit figuur 1. Straling vanuit de ruimte wordt door de hoofdspiegel in het brandpunt gefocussieerd. Juist voor het brandpunt staat de secundaire spiegel, die door zijn bolle vorm de straling naar het uiteindelijke brandpunt achter de hoofdspiegel kaatst. Daarom zit er een groot gat in het centrum van de hoofdspiegel. Achter de hoofdspiegel is de waarnemingsapparatuur opgesteld.

In een dergelijke opstelling fungeert de hoofdspiegel als objectief en de secundaire spiegel als oculair, zoals bij een gewone verrekijker het geval is. De lenzen zijn nu echter door spiegels vervangen.

Snel bewegende spiegel

Zelfs op het topje van de berg Mauna Kea heeft men nog last van waterdamp in de atmosfeer. De hoeveelheid kan door de wind en de grilligheid van de atmosfeer van seconde tot seconde sterk wisselen.

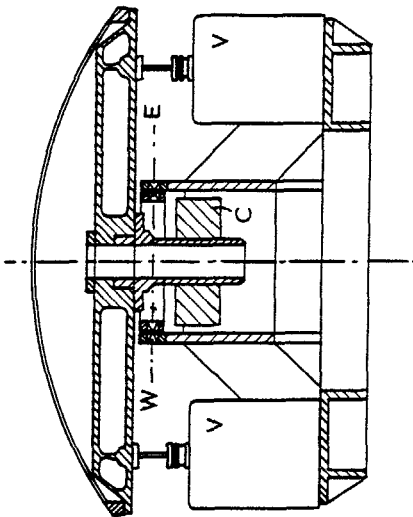
Dat is erg storend voor de waarnemingen, zodat men daarvoor naar een bruikbare oplossing heeft gezocht. Door afwisselend naar en naast het te bestuderen object te kijken, wordt het mogelijk voor storingen te corrigeren door het aftrekken van signalen. De telescoop zelf is veel te zwaar om een tiental malen per seconde heen en weer te bewegen, maar door een geringe kanteling van de secundaire spiegel om een vast punt blijkt het mogelijk het zelfde resultaat te bereiken. Omdat door het kantelen de waarnemingstijd zeer klein wordt, moet de kanteling zelf in een zo kort mogelijke tijd worden uitgevoerd. Daarom moet de secundaire spiegel een geringe massa hebben.

Gewoonlijk worden telescoopspiegels van glas gemaakt. Daarbij moet de dikte tenminste éénzevende deel van de diameter zijn om voldoende stevigheid en

Lichtgewicht kantelspiegel voor telescoop

vormvastheid te garanderen. Een glas-spiegel van 75 cm diameter zou in dit geval meer dan 100 kg wegen en dat is te veel om snel te kunnen bewegen.

Daarom is door de Fijnmechanische Werkplaats van de Faculteit Natuur- en Sterrenkunde van de Rijksuniversiteit te Utrecht een nieuwe spiegel ontworpen. Deze spiegel bestaat uit een slechts 3 mm dunne schaal met een stevige rand. Omdat de spiegel bol is, is de vorm enigszins te vergelijken met een zeepbel op een ring, zoals die bij het bellenblazen wordt gemaakt. Het zeepvlies is zeer dun, maar ontleent zijn stabiele vorm aan de ring waarop hij wordt gevormd. Op dezelfde wijze ontleent de dunne aluminium schaal zijn stijfheid aan de stevige rand, zie figuur 2.



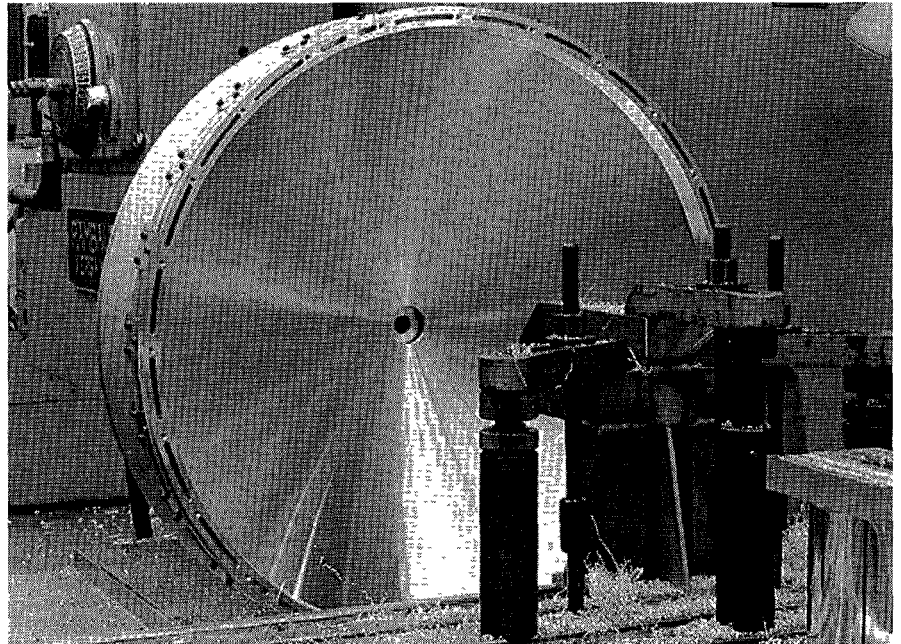
Figuur 2 De bolle secundaire spiegel kantelt om as *W* - Een en een as daar loodrecht op, aangedreven door de actuators *V* die afwisselend duwen en trekken. Het contragewicht *C* houdt de spiegel in balans. Met behulp van verplaatsingsopnemers (niet getekend) op deze beide assen kan de stand van de spiegel worden teruggekoppeld.

Berekeningen uitgevoerd door de vakgroep Technische Mechanica van de afdeling Werktuigbouwkunde aan de Technische Universiteit te Delft hebben aangetoond dat de spiegel onder invloed van de versnelling van zwaartekracht en aandrijving niet meer dan 1 micrometer zou vervormen.

Vervaardiging van de spiegel

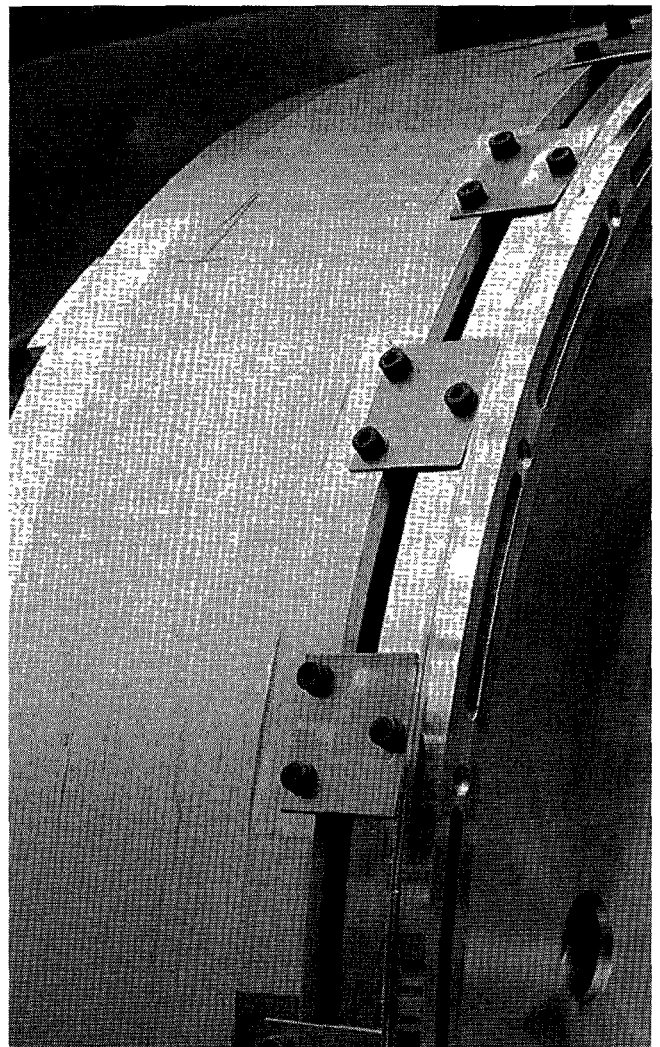
Het oppervlak van de spiegel wordt gedefinieerd door een hyperboloïde met een hoogte van 105 mm en een diameter van 750 mm.

Het bleek mogelijk een plak spanningsvrij aluminium te kopen waar de spiegel in



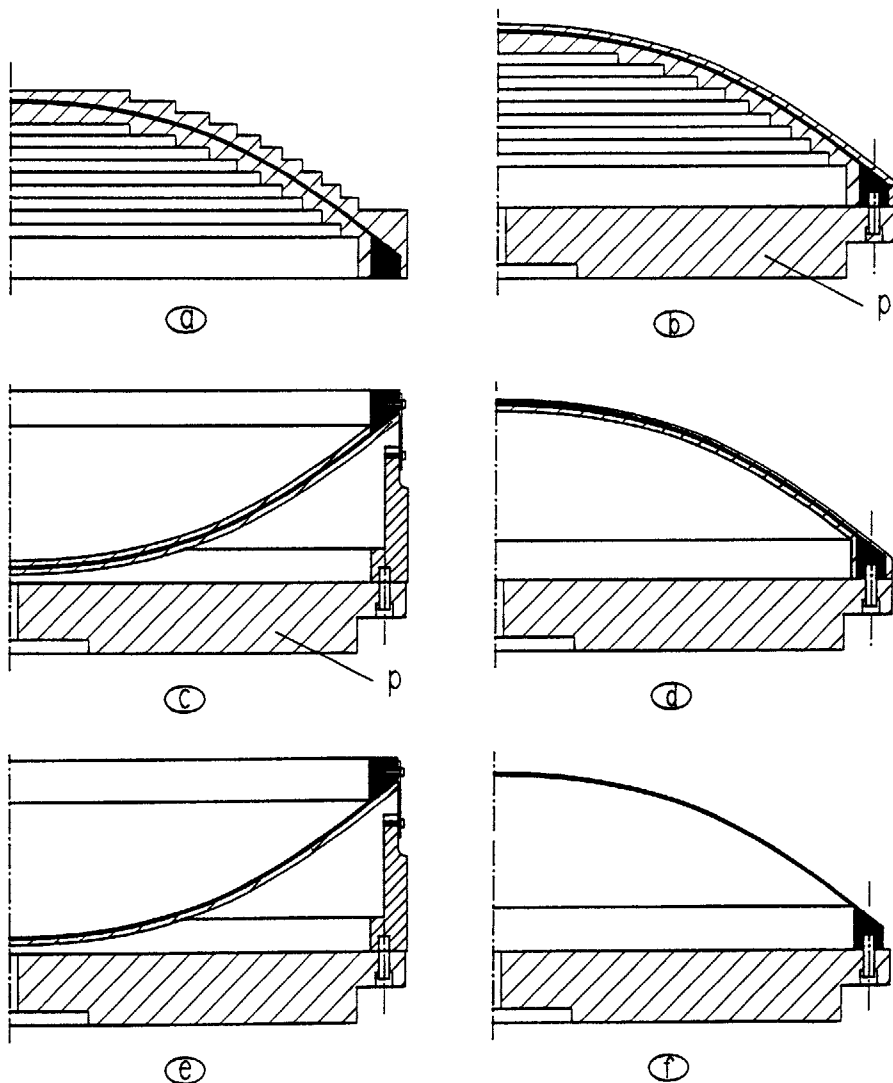
△ a

b ▽



Figuur 3

a: Het bewerken van de spiegel op de tot draaimachine omgebouwde freesbank. Aan de rand van de spiegel zijn de 24 bladveren te zien. b: Detail van de ophanging van de spiegel in bladveren op de mal.



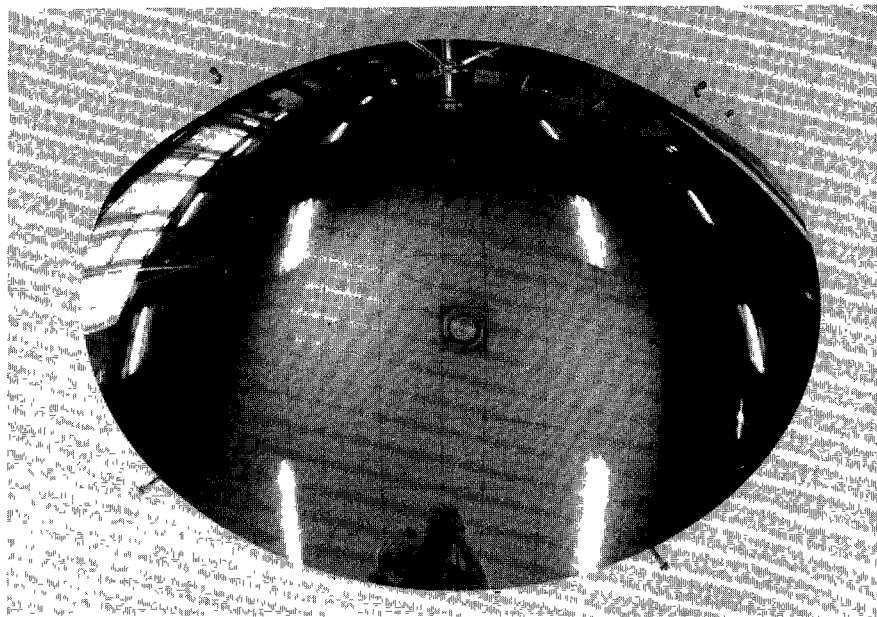
- △ **Figuur 4** **Bewerking van de spiegel uit vol materiaal.** Na deze bewerkingen is gewicht afgenomen van ruim 200 kg naar 7,5 kg.
- a: de ruwe vorm nadat met frezen het meeste materiaal was verwijderd;
- b: na het draaien van de bolle kan;
- c: het draaien van de holle kant terwijl de spiegel met bladveren is vastgezet. Voordat de spiegel wordt gekeerd, wordt de bovenrand vlakgedraaid en een referentierand gedraaid juist boven de bladveren. Daarmee wordt de spiegel na het keren op zijn plaats uitgericht.
- d: In een aantal stappen wordt de spiegel afgedraaid totdat de schaal een dikte van 3 mm heeft.

zijn geheel uit kon. Hieraan is de voorkeur gegeven boven het materiaalbesparende persen in een ruwe vorm. Bij het persen zijn meer restspanningen in het materiaal aanwezig en daardoor zullen eerder grotere vormveranderingen optreden bij relaxatie. Mede daardoor zou ook een extra gloeibehandeling noodzakelijk zijn. Het bewerken uit een massieve plak spanningsvrij materiaal geeft daarentegen meer zekerheid over het behoud van de vorm, ook na langere tijd.

De eerste voorbereiding van de ruim 200 kg zware plak bestond uit het wegfrezelen van zoveel mogelijk materiaal, waarna de voorbereikte vorm op een spanmal op de draaimachine werd bevestigd. Het nog te verwijderen materiaal wordt in dunne lagen afgenomen, om en om aan de binnen en de buitenzijde. Doordat er toch nog enige spanningen aanwezig zijn neemt de spiegel steeds een iets andere vorm aan zodra hij van de mal wordt losgenomen. Daarna moet hij weer spanningsvrij worden opgespannen voor de volgende bewerking.

Dit is een vrij lastige methode van werken, zodat naar een andere spanmethode is gezocht.

De belangrijkste vervorming treedt naar verwachting op in het vlak van de plak, voor de spiegel in radiale zin. Voor de bevestiging moet dus een spanmethode gezocht worden die stijf is in alle richtingen, maar lokale vervormingen toelaat. Vanuit dit gezichtspunt is het spiegel materiaal aan de rand opgehangen met bladveren aan een mal. De 24 bladveren bleken voldoende stijf in axiale-, radiale- en torsierichting om de spiegel zonder problemen te kunnen draaien, zie *figuur 3*. Lokaal kon de spiegel in radiale richting vrij vervormen, zodat de vorm continu werd gecor-



- △ **Figuur 5** **Spiegel na het nadraaien met diamant op een hydrostatisch gelagerde machine bij het Philips Natuurkundig Laboratorium.** In de spiegel zien we de fotograaf aan het werk (Foto's E. Landré).

Lichtgewicht kantelspiegel voor telescoop

rigereerd tijdens het draaien. Na het aanbrengen van een spanvlak met referentierand voor het uitrichten na het keren van de spiegel, werd de spiegel gekeerd en aan de andere zijde afgedraaid. Op deze wijze werd in een beperkt aantal keren omkeren van de spiegel een zeer grote vormnauwkeurigheid bereikt.

De gevolgde methode is aangegeven in de figuren 4a t/m 4f.

Na deze bewerkingen was het oorspronkelijk gewicht van meer dan 200 kg afgenomen tot slechts 7,5 kg bij een schaaldikte van 3 mm. Met de hulp van een rand die sinds het voorvriezen was blijven staan konden we achteraf vaststellen dat door de vrijgekomen spanningen een ovaliteit van 1,2 mm zou zijn ontstaan als wij niets ondernomen hadden. De ovaliteit hangt vermoedelijk samen met de oorspronkelijke walsrichting van het materiaal, die nog herkenbaar bleek ondanks de stuikbewerkingen en warmtebehandeling die het materiaal bij de fabrikant had ondergaan.

Na deze voorbewerkingen is de spiegel met diamant nagedraaid bij het Philips Natuurkundig Laboratorium op een hydrostatisch gelagerde draaimachine. Bij deze laatste bewerking, waarbij slechts enkele honderdste millimeters werden weggenomen, kreeg de spiegel een zeer nauwkeurig en glad oppervlak van bijna lichtoptische kwaliteit, *figuur 5*.

Metingen op een Zeiss meetmachine gaven als resultaat dat de gefabriceerde vorm nergens meer dan 9 micrometer afweek van de theoretisch gewenste vorm

Aandrijving van de spiegel

Uit berekeningen bleek dat de spiegel moest kunnen kantelen om een vast punt op de centrale as ter hoogte van de rand in een willekeurige richting. Dit is gerealiseerd door een cardanische ophanging met vier elastische kruisveerscharnieren. De aandrijving van de kantelbeweging van de spiegel gebeurde door vier elektrische actuatoren (grote luidspreker-

Tabel 1 Berekende waarden van de massa en het massatraagheidsmoment voor een spiegel met een schaaldikte van 3 mm, rand, kruisvormige drager en contragewicht.

| | Massa in kg | Massatraagheidsmoment in kgm ² |
|-----------------------|-------------|---|
| Spiegelschaal | 4,7 | 0,26 |
| Rand | 2,8 | 0,24 |
| Kruisvormige drager | 4,3 | 0,13 |
| Centrale lagering | 1,4 | 0,04 |
| Contragewicht (staal) | 13,9 | 0,19 |
| Totaal | 27,1 | 0,86 |

spoelen), die bij een stroom van 20 ampère een kantelkracht van 200 N leveren, zodat 400 N per as beschikbaar is.

Een probleem vormde de koppeling van de lineaire beweging van de actuator met de kantelende rand (1,4 graden) van de spiegel. Koppelstangen met scharnieren hadden een te grote massa, zodat naar andere oplossingen gezocht moest worden. Uiteindelijk is gekozen voor een koppeling met ronde staven van 3 mm doorsnede, zie *figuur 2*. De staven werden aan beide zijden ingeklemd. Ze waren enerzijds stijf genoeg om niet te knikken bij het overbrengen van de drukkracht van 200 N als ze maximaal uitgebogen stonden, anderzijds waren ze soepel genoeg om geen al te grote dwarskrachten op de actuator over te brengen bij het uitbuigen. In een laboratoriumopstelling werd deze constructie met succes getest. Daarbij kwam echter wel een belangrijk punt naar voren. Door de vele belastingwisselingen bleek de staaf uit de inklemming te kruipen. Door de staaf aan de uiteinden met een dwarspennetje te borgen tegen kruipen werd dit euvel verder voorkomen.

Het punt waarom de spiegel kantelt (as W - E in *figuur 2*) ligt niet in het zwaartepunt. Het leek verstandig een contragewicht aan te brengen ter balancerings, zodat geen statische kracht meer door de actuatoren hoeft te worden opgebracht. De grootte van de massa en van de hefboom is zo gekozen dat de bijdrage aan het massatraagheidsmoment bij kanteling minimaal is. Aangezien bij de berekening

van het massatraagheidsmoment de massa evenredig, maar de afstand van het rotatiemiddelpunt kwadratisch meetelt, is de compensatiemassa zo dicht mogelijk bij het zwaarte punt gebracht. Uit *tabel 1* blijkt dat dit goed gelukt is. Spaken en spiegel wegen 11,8 kg met een massatraagheidsmoment $J = 11,8 \text{ kgm}^2$ en een contragewicht van 13,9 kg met een massatraagheid van $0,19 \text{ kgm}^2$.

Door lateraal verschuiven van de cardanische ringen bleek het mogelijk in beide asrichtingen zeer nauwkeurig te balanceren

Omdat hoog op de Mauna Kea zeer extreme temperaturen kunnen voorkomen is de spiegelconstructie met XYZ-positieersleden in een klimaatkamer bij temperaturen tot -25 graden celsius getest, de laagste temperatuur waarbij de telescoop nog in bedrijf is.

Omdat bij de constructie reeds rekening gehouden was met deze temperatuurverschillen, leverde deze test geen problemen op.

Nu ruim twee jaar nadat de telescoop in gebruik genomen is, functioneert de mechanische constructie nog steeds zonder haperen.

Verantwoording

Ontwerp en vervaardiging van de telescoop waren onderdeel van een Brits-Nederlands samenwerkingsproject waarvoor ir H. van der Stadt van de Faculteit Natuur en Sterrenkunde van de Rijks Universiteit te Utrecht projectleider was voor de secundaire optiek met positionerings mechanismen.