

Het ontwerp van een 2-assige scanspiegel voor de ruimtevaart

Jeroen Heijmans¹, Joep Pijnenburg², Arthur Berkhoff² en Martijn Termeer²

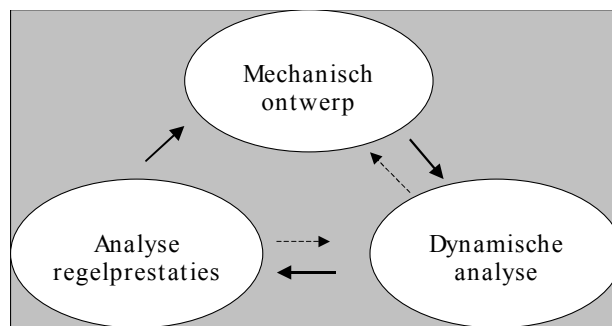
¹ Technische universiteit Eindhoven, faculteit werktuigbouwkunde

² TNO TPD Delft, Postbus 155, 2600 AD Delft

Scanspiegels hebben een breed toepassingsgebied in zowel de lucht- en ruimtevaart als wel in toepassingen op aarde, van laserbewerkingsmachines tot telescopen. De hier besproken scanspiegel is als voorbeeld gekozen voor technologieontwikkeling binnen TNO TPD met als toepassingsgebied de ruimtevaart. In het ontwerpproces is een ontwerpfilosofie gehanteerd waarbij nauw wordt samengewerkt tussen de gebieden: Fijnmechanisch ontwerpen, dynamica en regeltechniek. Het doel van deze korte ontwerplus is het vroegtijdig optimaliseren van het ontwerpproces van complexe fijnmechanische systemen waarin dynamica en regeltechniek een belangrijke rol spelen. De ontworpen scanspiegel heeft een spiegel van 77 mm x 109 mm en een hoekbereik van $\pm 7,5^\circ \times \pm 1,0^\circ$. De scanspiegel dient daarbij te corrigeren voor kleine hoekverstoringen tot 200 μrad met een frequentie van 100 Hz.

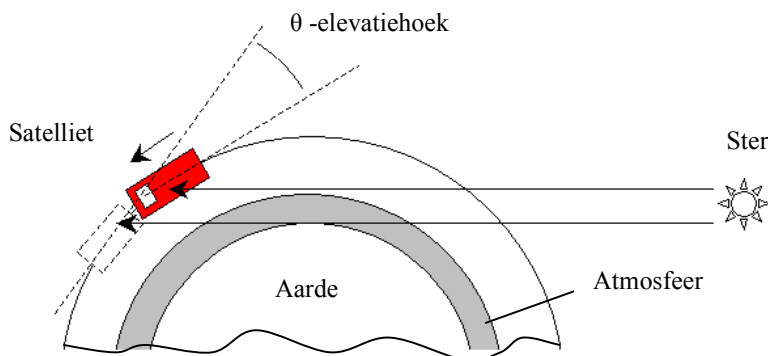
Inleiding

Gezien het belang en de complexiteit van de regeltechnische- en dynamische aspecten van de scanspiegel is dit onderwerp gekozen voor de genoemde technologieontwikkeling. De ontwerplus die hierbij gehanteerd is is schematisch weergegeven in figuur 1.



Figuur 1: Schematische weergave van samenwerking in het ontwerpproces

De beoogde ruimte-telescoop waarvoor de scanspiegel kan dienen, zal aan boord van een satelliet onderzoek doen naar de samenstelling van de atmosfeer. De werking van dit instrument is gebaseerd op de spectrale verandering van sterlicht wanneer dit door de atmosfeer schijnt. De beweging van de satelliet rond de aarde en het pad van het sterlicht door de atmosfeer zijn schematisch weergegeven in figuur 1.



Figuur 2: Schematische weergave van het werkingsprincipe

Om de verschillende geschikte sterren in beeld te krijgen en te volgen met een maximaal toelaatbare onnauwkeurigheid van $30 \mu\text{rad}$ is een scanspiegel nodig. De scanspiegel dient daarbij ook te corrigeren voor hoekverstoringen tot $200 \mu\text{rad}$ welke optreden als gevolg van samenstelling- en toestandvariaties in de atmosfeer. In een samenwerkingsverband van TNO TPD met de Technische Universiteit van Eindhoven is hiervoor een ontwerp gemaakt.

De belangrijkste eisen waaraan de scanspiegel dient te voldoen staan opgesomd in tabel 1.

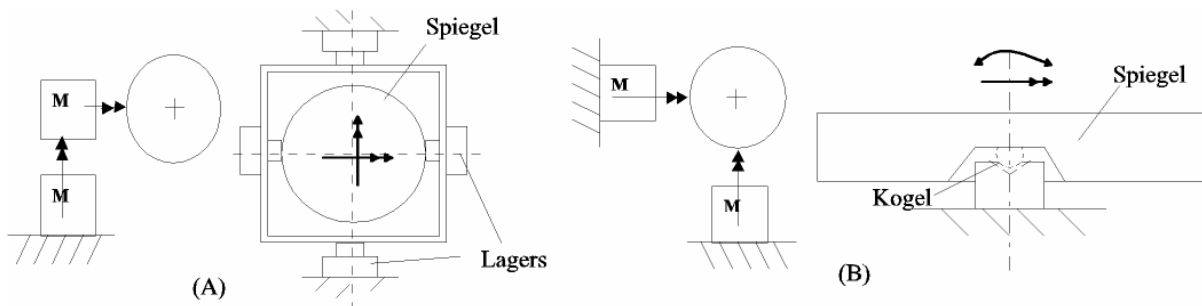
Uitvoeringseisen:	
(Elliptische) spiegelafmeting:	109mm x 77mm
Gezichtsveld	$\pm 7,5^\circ$ (azimut) x $\pm 1,0^\circ$ (elevatie)
Max. hoekonnauwkeurigheid	$30 \mu\text{rad}$
Aanstuurfrequentie:	$> 100 \text{ Hz}$
Ruimtevaartseisen:	
Temperatuursbereik	-40°C tot 60°C
Vacuüm	$1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$
Levensduur	> 5 jaar
Versnellingen gedurende de lancering	45 g
Alg. eigenschappen:	Lage massa, volume en vermogen

Tabel 1: Eisen aan de scanspiegel

Opbouw:

De scanspiegel dient te scannen met relatief hoge frequenties waardoor de dynamische eigenschappen van de scanspiegel een belangrijke rol spelen. De spiegelmasse en het traagheidsmoment dienen om deze reden laag te blijven. Door de (virtuele)rotatiepool samen te laten vallen met het massamiddelpunt blijft het traagheidsmoment minimaal. Daarnaast is het van belang dat de rotatiegeleiding het traagheidsmoment zo min mogelijk verhoogt. Er zijn hierbij twee configuraties mogelijk:

De seriële uitvoering, waarbij de rotatie-assen zijn gestapeld, en de parallel uitvoering. Beiden zijn weergegeven in figuur 1 met daarbij een uitvoeringsvoorbeeld.



Figuur 3: Schematische weergave met uitvoering van: (A) Seriële versus (B) parallelle configuratie

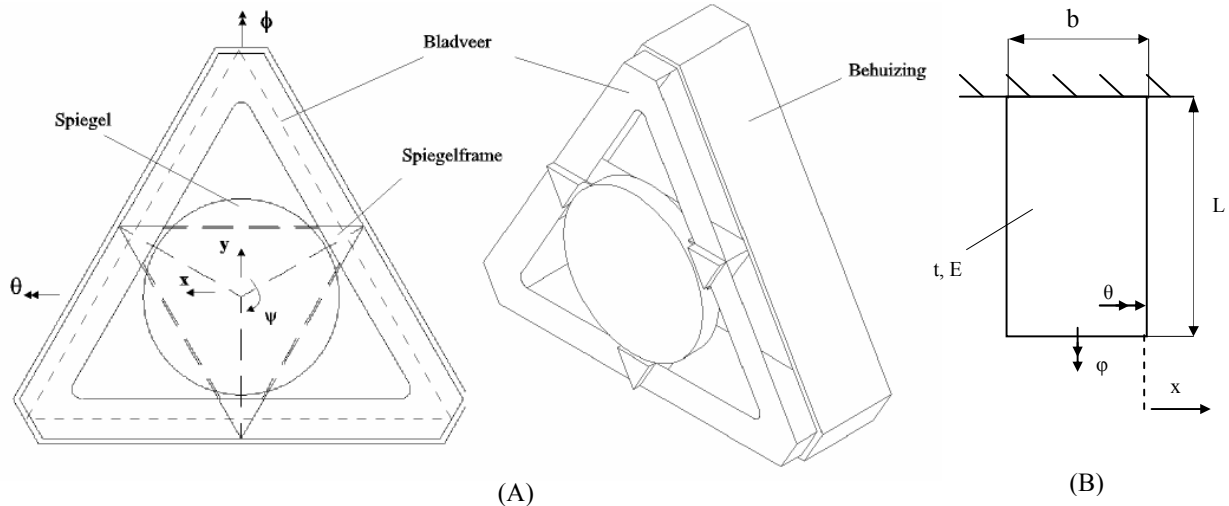
De meest voorkomende configuratie voor het uitvoeren van grote hoekverdraaiingen is de seriële uitvoering met gelagerde assen. In dit geval draagt de rotatie-as welke staat afgesteund op de vaste wereld zowel de spiegel als de tweede rotatie-as. Het hiermee betrokken traagheidsmoment is groter dan wanneer de rotatiegeleiding parallel wordt uitgevoerd waardoor de laatste de voorkeur heeft.

Een andere afweging m.b.t. de rotatiegeleiding is het toepassen van lagers of elastische elementen. Voor het uitvoeren van de vereiste rotaties van $\pm 7,5^\circ \times \pm 1,0^\circ$ behoort een elastische rotatiegeleiding nog tot de mogelijkheden. Voordelen van de elastische geleiding is dat er geen hystereses optreedt welke de minimale hoekonnauwkeurigheid limiteert, er geen smering hoeft te worden toegepast en de geleiding, mits goed uitgevoerd, een oneindige levensduur heeft.

De elastische rotatiegeleiding dient hierbij de twee scanrotaties met een zo'n laag mogelijke rotatiestijfheid vast te leggen om het actueermechanisme klein te houden. De overige vrijheidsgraden dienen met hoge stijfheid te worden vastgelegd.

Concepten:

Twee concepten zijn hiervoor bedacht waarin het eerste concept voor de rotatiegeleiding bestaat uit drie radieel geplaatste, gevouwen bladveren, figuur 4.



Figuur 4: (A) Rotatiegeleiding met drie gevouwen bladveren, (B) Bladv. dimensies

De bladveren zijn vervolgens middels een ‘spiegel-krachtframe’ verbonden aan de spiegel om deze spanningsloos op te hangen. De spiegel kan hierdoor dun worden uitgevoerd waardoor de spiegelmassa laag blijft.

De (z)-hoogte van de spiegel is door de bladveren nog niet vastgelegd en dit zou kunnen gebeuren door een spriet te plaatsen onder het midden van de spiegel. Omdat de belasting van de spriet echter ongunstig is bij de grote rotaties rond het massamiddelpunt in de spiegel, en een directe bevestiging met (en belasting van) de spiegel moet worden vermeden is er een ander oplossing bedacht. Er worden drie actuatoren toegepast welke zowel de twee scanrotaties als de (z)-hoogte bepalen. De actuatoren worden aan de stijve hoekpunten van het spiegel-krachtframe bevestigd. Op deze manier is er een symmetrisch ontwerp gecreëerd met een thermisch centrum in het midden van de spiegel.

De gevouwen bladveren leggen ieder één vrijheidsgraad vast waarmee de translaties x, y en de rotatie ψ van de spiegel vastliggen, zie figuur 4 (A). De bladveren lopen naar buiten smal toe hetgeen de hoogkante-buigstijfheid benadert welke wordt beschreven met:

$$C_{x,hoogk} = \frac{3EI}{L^3} \quad (1)$$

Waarin:

‘t’ de dikte; ‘b’ de breedte en ‘L’ de lengte van de bladveer, aangegeven in figuur 4 (B).

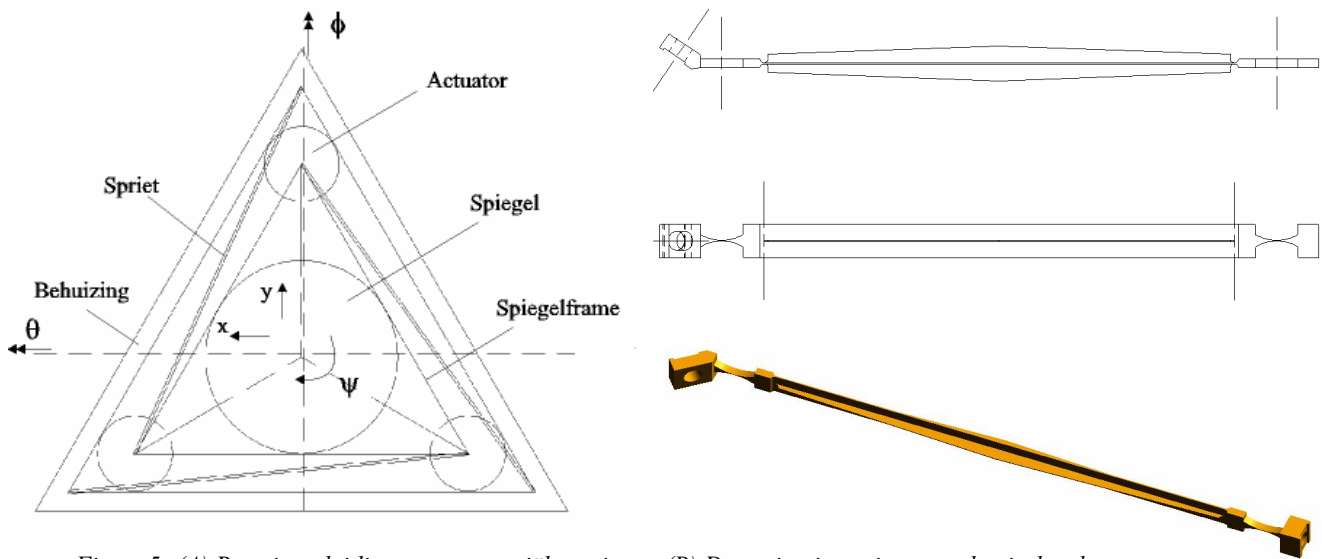
Het materiaal in het midden van de bladveer is verwijderd waardoor een V-vorm ontstaat. Hierdoor is de buig- en torsiestijfheid verlaagd en stijgt de eigenfrequentie van de bladveer.

Het is van belang om de dikte ‘t’ te minimaliseren voor een zo laag mogelijke buig- en torsiestijfheid van de bladveer, ($K_{\text{buiging},\theta}$; $K_{\text{torsie},\varphi}$ (t^3 , E^{-1}) en om de optredende spanning laag te houden (σ_{buig} , τ_{torsie} (t^{-2}). Door staal te gebruiken met een hoge E-modulus en vloeispanning kan een bladveerdikte van 0,15 mm worden gebruikt en toch worden voldaan aan de vereiste hoogkante-buigstijfheid. Dit komt echter niet ten goede aan de knikkracht welke wordt beschreven volgens vergelijking (2):

$$F_p = 0,42 \frac{bt^3 E}{L^2} \quad (2)$$

De geoptimaliseerde stalen bladveren waarvan de randen zijn omgezet blijken dan ook kritisch te zijn voor de gestelde lanceerbelasting van 45 ‘g’.

Het tweede concept voor de rotatiegeleiding bestaat uit drie tangenteel geplaatste sprieten, figuur 5 (A). De stijfheid van de gevouwen bladveer in zijn vouwlijn is nu vervangen door de hoge axiale stijfheid van de spriet. Het spiegelframe zorgt er voor dat er een grote sprietenlengte ontstaat waardoor het mogelijk wordt om de grote rotatie van $\pm 7,5^\circ$ elastisch uit te voeren. Omdat een dunne spriet echter niet zal voldoen aan de gewenste hoge knikkraft en eigenfrequentie dient het middendeel verstijfd te worden. Een andere mogelijkheid is om de sprieten voor te spannen door een koppel aan te brengen rond de hartlijn van de spiegel. Een andere en de meest gunstige sprietuitvoering is weergegeven in figuur 5 (B). In deze uitvoering wordt voldaan aan een hoge knikkraft, eigenfrequentie en axiale stijfheid en zijn de stijfheden in de overige richtingen het laagst.



Figuur5: (A) Rotatie-geleiding met tangentiële sprieten, (B) De sprietuitvoering met elastische elementen

De vijf vrijheidsgraden van de spriet zijn hierin opgesplitst over vijf elastische elementen. Het kruisvormige profiel in het midden zorgt voor een lage torsiestijfheid en een hoge buigstijfheid. De vier overige elastische scharnieren laten ieder elk één rotatie vrij. Op deze manier krijgt de spriet een zeer lage stijfheid in de vijf richtingen waarin dit is gewenst en toch een hoge axiale stijfheid, knikkraft en eigenfrequentie. De sprieten zijn uitgevoerd in een Titanium-Aluminium legering met een hoge vloeispanning van 1200 MPa en een E-modulus van 115 GPa. Dit maakt het mogelijk om de elastische scharnieren op de sprietuiteinde de grote hoekverdraaiing te laten uitvoeren.

Wanneer nu de eigenschappen van beiden concepten naast elkaar worden gelegd, tabel 2, dan geeft de zojuist besproken sprietuitvoering de laagst mogelijke (scan)rotatiestijfheid waarbij tevens aan alle overige eisen wordt voldaan.

	Bladveren	Sprieten uit elastische elementen
Stijfheid: $K_{scanrot}$, Nm/rad	0,9	0,3
Stijfheid: C_{invlak} , N/m	$4 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$
Knik, N	200	450

Tabel 2: Eigenschappen van de rotatiegeleiding uit bladveren en sprieten

De spiegel

De spiegel welke de grootste massa en traagheidsmoment bezit is uitgevoerd in Silicium Carbide en elliptisch van vorm. Silicium Carbide heeft een zeer hoge specifieke stijfheid en gunstige thermische eigenschappen. Wanneer de buigstijfheid wordt vergeleken met die van een opgelegde aluminium spiegel dan kan de Silicium Carbide spiegel bijna twee maal zo dun en 45 % lichter worden uitgevoerd.

Met een traagheidsmoment van de SiC-spiegel van $2,4 \cdot 10^{-4}$ kgm^2 en een massa van 0,32 kg kunnen te samen met de stijfheden uit tabel 2 de volgende eigenfrequenties worden voorspeld:

In de richting waarbij de eigenmode overeenkomt met de scanrotatie:

$$f_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{J}} = 5\text{Hz} \quad (3)$$

De door de geleiding vastgelegde translaties in het vlak van de spiegel:

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m}} = 480\text{Hz} \quad (4)$$

De eigenfrequentie van 5 Hz ligt onder de te verwachten laagste stoorfrequentie van 10 Hz . De eigenmode bij een frequentie van 480 Hz waarbij de spiegel in zijn spiegervlak beweegt, ligt bijna een factor 5 hoger dan de aanstuurfrequentie van 100 Hz. Deze waarden tonen de goede eigenschappen van de ontworpen rotatiegeleiding.

Het spiegelframe waar aan de spiegel is bevestigd is een piramidevormige aluminium frame waarvan de bovenzijde open is, figuur 4. Hierdoor ontstaat een zeer licht en stijf geheel in de richting waarin dit is gewenst en is het frame slap daar waar de spiegel aanligt. Door de spiegel op deze drie plaatsen in twee vrijheidsgraden te bevestigen ligt de spiegel statisch bepaald in het frame. De thermische uitzettingsverschillen worden op deze wijze opgevangen met minimale introductie van spanningen in de spiegel.

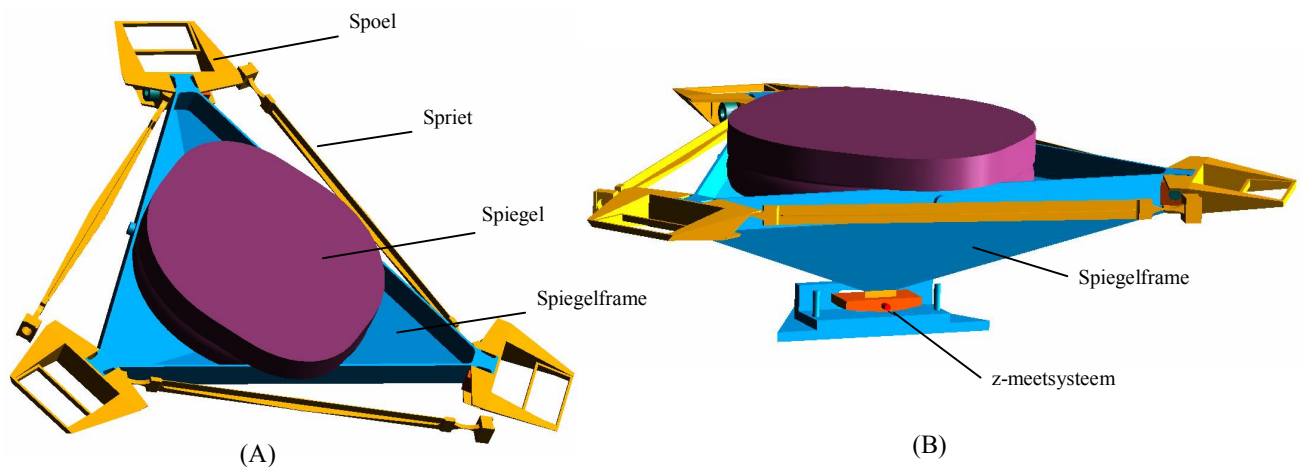
De actuatoren

Aan de stijve hoekpunten van het spiegelframe zijn de actuatoren bevestigd. Er is gekozen voor electro-magnetische actuatoren omdat deze een contactloze beweging kunnen uitvoeren met een groot bereik en een lage onnauwkeurigheid. Door de spoelen te plaatsen in de hoekpunten van het spiegelframe wordt een grote armlengte gecreëerd. Dit zorgt voor een lage actuatorkracht en een hoge (scan)rotatiestijfheid.

De spoelen welke het lichtste onderdeel van de actuatoren zijn, zijn aan het frame gemonteerd en het magneetcircuit staat afgesteund op de vaste basis.

De sensoren

Voor het meten van de scanspiegelposities dient er in de scanspiegel een sensor te worden opgenomen welke de z-hoogte meet. De twee rotaties worden gemeten in de telescoop aan de hand van de uitgaande lichtbundel op een PSD-sensor. De z-hoogte van de spiegel wordt gemeten door aan de onderzijde van het spiegelframe in de hartlijn van de spiegel, een capacitieve sensor te plaatsen, zie figuur 5.



Figuur 6: (A) Samenstelling spiegel, frame, spoelen en sprieten; (B) z-sensor onder spiegelframe

De sensor meet contactloos de hoogte van een dubbelgekromd oppervlak welke is bevestigd aan de piramidepunt. Op deze manier kan de hoogte onafhankelijk van de scanrotaties worden bepaald en is één sensor afdoende.

De lanceerbeveiliging

Voordat de satelliet in zijn baan is gebracht en de scanspiegel operationeel wordt dient de spiegel vast te worden gezet. De ontworpen sprietgeleiding heeft een hoge stijfheid in drie vrijheidsgraden en een voldoende hoge knikkracht en eigenfrequentie om te kunnen worden gebruikt gedurende de lancering. De lanceerbeveiliging dient de overige vrijheidsgraden vast te zetten: de scanrotaties en de hoogte van spiegel. Deze worden vastgezet door de drie stijve hoekpunten van het spiegelframe geometrisch vast te zetten in de z-hoogte. Het vrijgeven van het spiegelframe gebeurt middels een elastisch geleide beweging welke wordt uitgevoerd middels electro-magnetische actuatoren.

De geassembleerde scanspiegel in een aluminium behuizing komt er als volgt uit te zien, figuur 7.

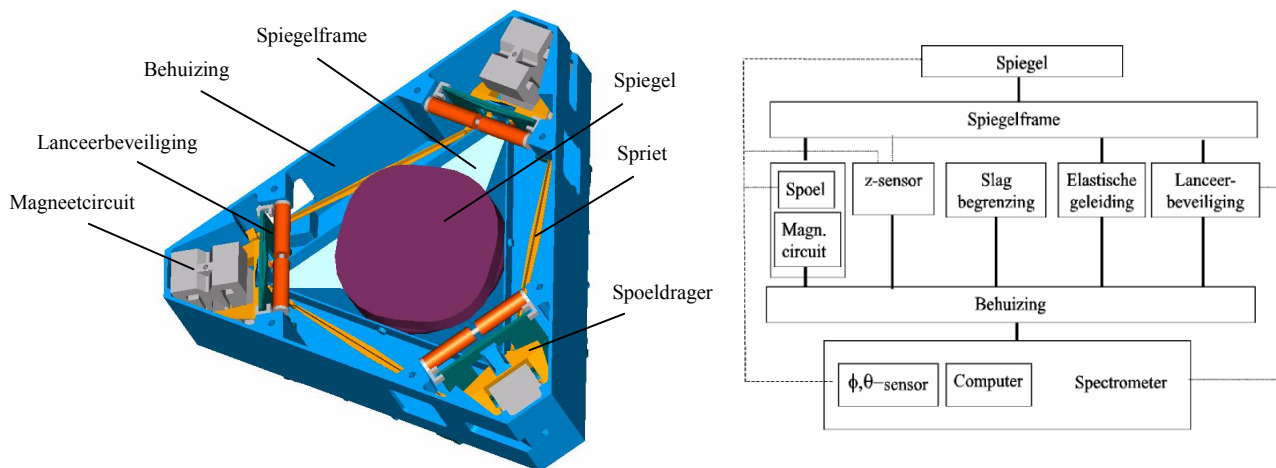
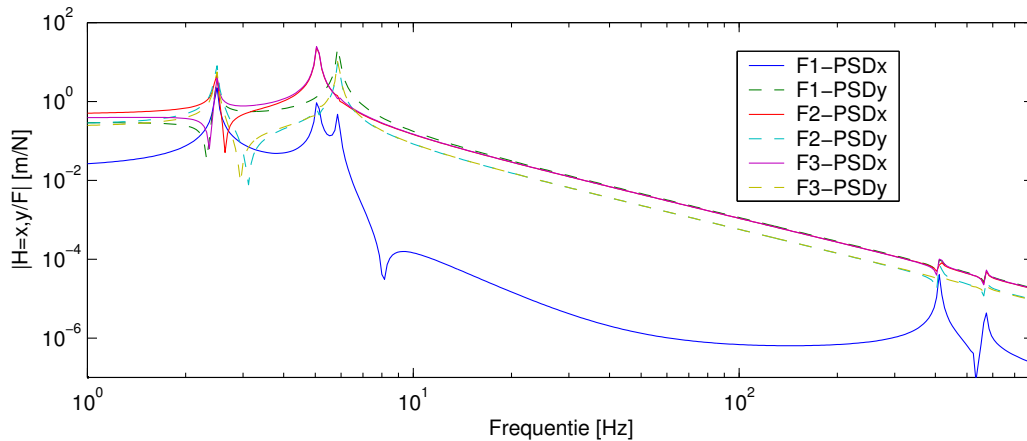


Fig 7: Samenstelling en schematische weergave van de scanspiegel

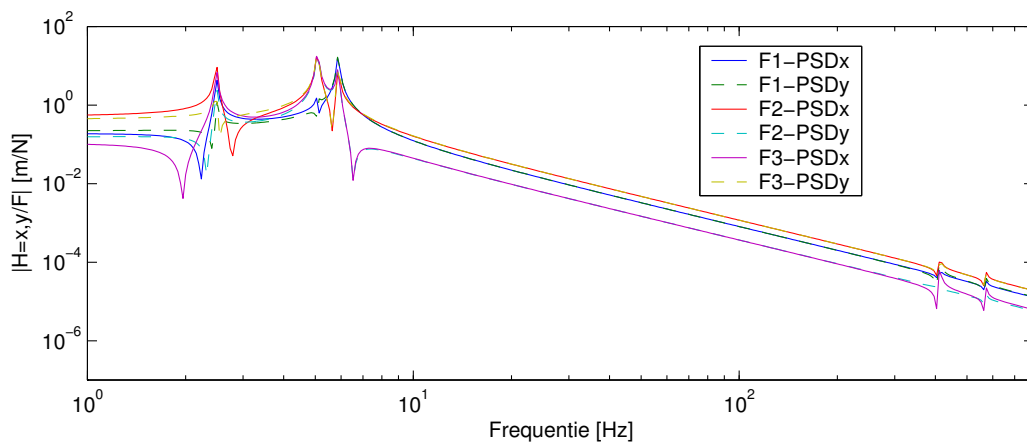
Dynamica analyses

De scanspiegel maakt grote rotaties voor het zoeken en volgen van sterren. Tijdens het volgen van een ster maakt de scanspiegel kleine rotaties voor het corrigeren van kleine hoekverstoringen. De grote rotatie van 7,5 graden rond de azimut-rotatieas veroorzaakt in meer of mindere mate geometrisch niet-lineair gedrag. Om te kijken of de dynamische eigenschappen gevoelig zijn voor deze schuinstand zijn de modes en overdrachten bepaald in de nominale 0 en 7,5 graden gekantelde stand. In een modale superpositie worden overdrachten bepaald, m.b.v. de modes en eigenfrequenties, van 3 actuator posities naar vier translaties op de spiegel. De translaties worden middels de afstanden tot de rotatiepool omgerekend naar 2 hoekverdraaiingen van de spiegel. De hoeken worden vervolgens weer omgerekend naar x en y verplaatsingen op de lichtgevoelige PSD-sensor met een weglengte van 2 m. De standveranderingen blijken van kleine invloed te zijn voor de dynamica en de verwachting is dat de adaptieve regelaar die het mechanisme moet aansturen van deze veranderingen in de overdrachten geen last heeft.

De uiteindelijke set overdrachten die gebruikt wordt om de regelprestaties te bepalen is dus een matrix van 3 bij 3: van drie krachten naar de z -verplaatsing ten opzichte van het spiegelframe en de x - en y -verplaatsing op de PSD-sensor. De overdrachten worden bepaald van 0 tot 800 Hz met 15 modes en een dempingsverliesfactor van $\eta=0.01$. Wanneer de PSD-sensor zo is opgesteld dat een rotatie om de elevatie-as leidt tot zuiver x verplaatsing op de PSD-sensor, worden de volgende overdrachten gevonden, figuur 8. Hierbij is F1 de kracht van de actuator die op de azimut-rotatieas van de spiegel ligt.



Figuur 8: Absolute waarde van overdrachten van 3 actuatorkrachten naar x en y verplaatsingen op de PSD.

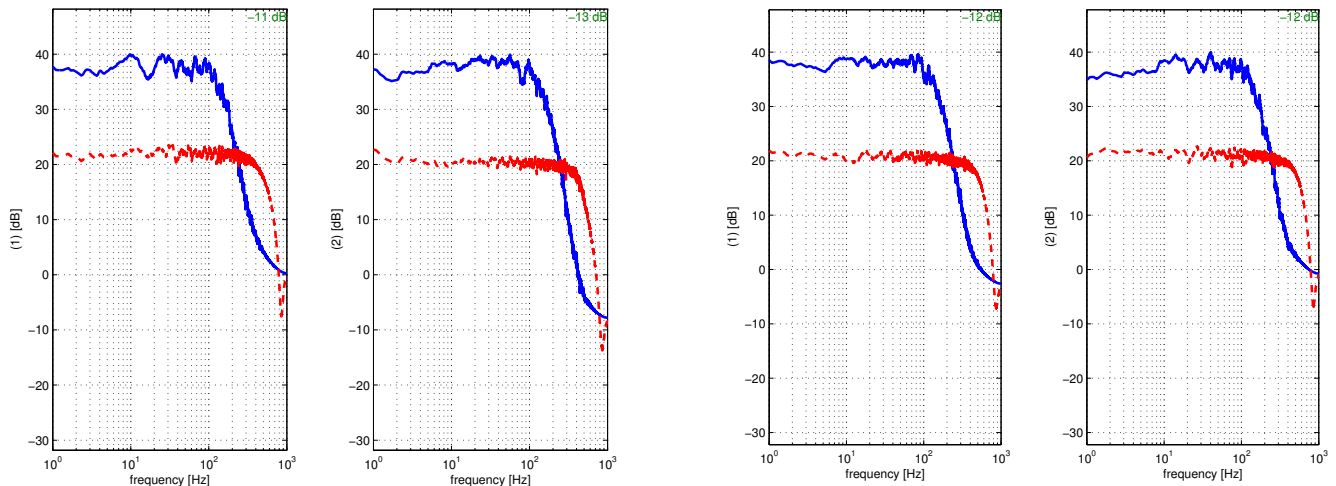


Figuur 9: Absolute waarde van overdrachten van 3 actuatorkrachten naar x en y verplaatsingen op de PSD voor de 'volledig gekoppelde' situatie.

Voor een hoek van 45 graden tussen de elevatie-as en de x-as van de PSD-sensor, worden andere overdrachten gevonden, waarbij de kracht van actuator 1 bijdraagt ('volledig gekoppelde') aan beide verplaatsingen op de PSD-sensor zoals in figuur 9 te zien is.

Regeltechnische analyse

De voorspelling van de prestatie van het systeem is gebaseerd op een kwadratische criteriumfunctie, met als geminimaliseerde sensorsignalen de x- en y-signalen van de PSD-sensor en de verplaatsing van de spiegel in de (z-)hoogte. Er is geen onafhankelijk referentiesignaal beschikbaar dus het systeem moet worden beschouwd als een teruggekoppeld systeem. De bandbreedte zoals bepaald uit het vermogensspectrum van de PSD signalen is 150 Hz. Voor de analyse van het systeem wordt het 'Internal Model Control' principe verondersteld. De bemonsteringsfrequentie van het regelsysteem is 2 kHz. De prestaties zijn bepaald voor de twee oriëntaties van de PSD-sensor (zie hierboven). Voor beide situaties wordt een reductie van ongeveer 12 dB bereikt.



Figuur 10: Regelprestaties van de spiegel (Doorgetrokken lijnen zonder regelaar, gestippeld met regelaar). Voor de 0° situatie (links) wordt 11 en 13 dB reductie gehaald in respectievelijk de x en y verplaatsing; voor de 45° situatie (rechts) voor beide verplaatsingen 12 dB.

Besluit

Het ontwerpproces van de scanspiegel is uitgevoerd met een ontwerpfilosofie waarbij kennis van het fijnmechanisch ontwerpen gecombineerd is met de kennis van dynamica en regeltechniek. Hierdoor was het mogelijk om in een vroeg stadium het ontwerp te optimaliseren en een regelstrategie te ontwikkelen. Dit heeft het ontwerptraject versneld en geleid tot een veelbelovend scanspiegelontwerp.

Voor het mechanische ontwerp van de scanspiegel is gewerkt volgens de ontwerpmethodiek van de groep Constructies & Mechanismen o.l.v. dr.ir. P.C.J.N. Rosielle van de Technische Universiteit Eindhoven. Hierin staan de ontwerpaspecten als het statisch bepaald, licht en stijf construeren, centraal. De ontworpen elastische, parallel uitgevoerde rotatiegeleiding met een groot gezichtsveld en de spanningsloos opgehangen spiegel geeft een vernieuwend scanspiegelontwerp.

Eind 2003 zal er bij TNO TPD een prototype van dit ontwerp gerealiseerd zijn. Het verloop van de verdere ontwikkelingen en de behaalde resultaten zullen in de nabije toekomst worden gepubliceerd.

Voor meer informatie kunt u contact opnemen met Joep Pijnenburg: Pijnenburg@tpd.tno.nl

Literatuur:

J.A.C.Heijmans, Het ontwerp van een 2-assige scanspiegel met een elastische rotatiegeleiding, TNO rapport DOI-RAP-030017, '03

P.C.J.N.Rosielle, Constructieprincipes 1, dictaat 4007, Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Werktuigbouwkunde, '98

M.P.Koster, Constructieprincipes, Twente University press, ISBN: 9036514568, '00

M.K. Termeer, 'Modelling of dynamic behaviour and deformations in high precision instruments', proceedings of the 3rd International Conference of EUSPEN 2002, Vol. 1, 21-24.