

Piëzo-aangedreven vervormbare spiegel

Dr.ir. G. van Schothorst *In het algemeen wordt een optische systeem gevormd door een samenstel van een aantal starre lenzen en spiegels. In een aantal gevallen kunnen de optische elementen ten opzichte van elkaar bewogen worden, zodat het optische systeem een bepaald bereik krijgt en niet slechts in één bepaald werkpunt functioneert. Bekende voorbeelden zijn de verrekijker en het fototoestel. Voor hoogwaardige optische systemen, zoals die onder andere voorkomen in de ruimtevaart, in de astronomie, de laserindustrie en ook in de lithografische industrie, kan het starre karakter van de optische elementen een beperking vormen.*

Daarvoor kunnen twee redenen zijn. Ten eerste kan het zijn dat de optische elementen niet ideaal zijn, zodat zij beeldfouten veroorzaken. Om deze beeldfouten, de zogenaamde aberraties, te elimineren, zullen de optische eigenschappen moeten worden aangepast. Dit kan door de elementen zelf aan te passen (beter te maken), of door een compenserend element toe te voegen. Hierbij kan nog onderscheid worden gemaakt tussen fouten die constant zijn in de tijd (bijvoorbeeld fabricagefouten) en fouten die in de tijd variëren. Deze laatste kunnen veroorzaakt zijn door temperatuursinvloeden, doorzakking ten gevolge van gravitatiekrachten, en door veroudering (kruip). Ten tweede kunnen er externe verstoringen in de lichtweg van het optische systeem optreden, die afbeeldingsfouten veroorzaken. Een bekend voorbeeld is turbulentie in de astronomie.

In de bovengenoemde gevallen kan actieve optica [1,2] een oplossing bieden. Deze technologie, die zich voorlopig vooral richt op vervormbare spiegels, gaat uit van een compenserend optisch element met variabele optische eigenschappen. Getracht wordt, om de afbeeldingsfouten die zich manifesteren als een niet-vlak golffront, te corrigeren door de spiegel de geconjugeerde vorm van het niet-vlakke golffront te geven, mogelijk variërend in de tijd.

In dit artikel zal worden ingegaan op het concept-ontwerp van een piezo-aangedreven vervormbare spiegel. Eerst worden de specificaties opgesteld, daarna zal de conceptkeuze worden toegelicht. Vervolgens zal de conceptkeuze worden onderbouwd met enkele modelvormingsresultaten. Tenslotte zullen enkele aspecten

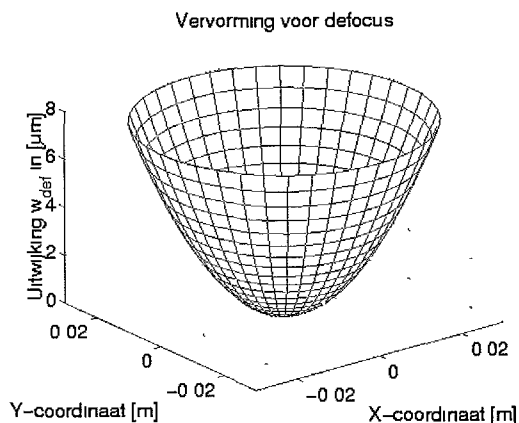
van de realisatie van de actief vervormbare spiegel worden belicht.

Specificaties

In de aanloopfase van het onderzoek is ervoor gekozen een eenvoudige vervormbare spiegel te realiseren, om ervaring op te doen met de voor actieve optica relevante technologieën. Daarbij is uitgegaan van een ronde spiegel met een diameter van 60 mm. In eerste instantie zullen slechts twee modes van vervorming worden bestudeerd, één voor defocus en één voor astigmatisme.

Parabolische vervorming.

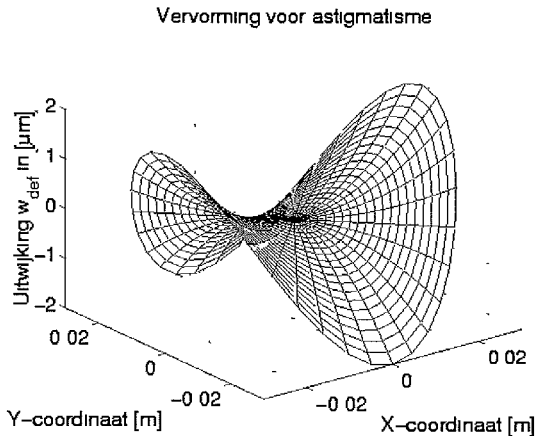
Door middel van de parabolische vervorming, geïllustreerd in figuur 1, kunnen de optische eigenschappen veranderd worden in de zin van focusering. Er is



Figuur 1 Gewenste vervorming voor defocus

Piezo-aangedreven vervormbare spiegel

Figuur 2 Gewenste vervorming voor astigmatisme



uitgegaan van de denkbeeldige situatie, dat een optisch systeem een beeldafstand s' heeft van 4 meter. Nu moet de actieve spiegel voor een (de)focussing kunnen zorgen, zodat ook een beeldafstand s' van bijvoorbeeld 3,4 m gerealiseerd kan worden. Vertaald naar de spiegel betekent dit, dat deze een beeldafstand $s'=3,4$ m en een objectafstand $s=-4$ m moet kunnen aannemen. Gegeven de basisformule voor een optisch systeem [3]:

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f}$$

levert dit een benodigde brandpuntsafstand $f \approx 23$ m voor de vervormbare spiegel. Met de formule $f = -R/2$ (zie [3]) wordt de kromtestraal $R = -45$ m gevonden, waarbij het min-teken aangeeft dat de spiegel concave is. Als de vervorming ten behoeve van defocus w_{def} wordt beschreven als functie van de straal r , dan wordt de gewenste kromtestraal gerealiseerd door $w_{def}(r) = \frac{1}{90} r^2$.

Dit levert een maximale uitwijking aan de rand van ongeveer $10 \mu\text{m}$.

Zadelvlakvormige vervorming.

Eén van de primaire en meest dominante aberraties in een optisch systeem is het zogenaamde astigmatisme. Dit verschijnsel veroorzaakt beeldfouten in de z van onscherpte, die corresponderen met een zadelvlakvormig golffront. Astigmatisme kan ook geïnterpreteerd worden als een verschil in (de)focussing in de twee loodrechte richtingen van het beeldvlak. Door de vervormbare spiegel de geconjugeerde zadelvlakvorm te geven, zoals getoond in figuur 2, kan voor astigmatisme worden gecorrigeerd.

Evenals bij defocus is uitgegaan van de denkbeeldige

situatie, dat de beeldafstand voor de vervormbare spiegel $s'=4$ m is, terwijl er een afwijking ten gevolge van astigmatisme is van $0,15 \mu\text{m}$ en $-0,15 \mu\text{m}$ voor de twee loodrechte richtingen in het beeldvlak. Met een gelijksoortige berekening als voor (de)focus, wordt gevonden dat dit overeenkomt met uitwijkingen aan de rand van ongeveer $2 \mu\text{m}$ in de ene richting en $-2 \mu\text{m}$ in de andere richting (zie ook figuur 2). De gewenste zadelvlakvervorming kan wiskundig worden beschreven door

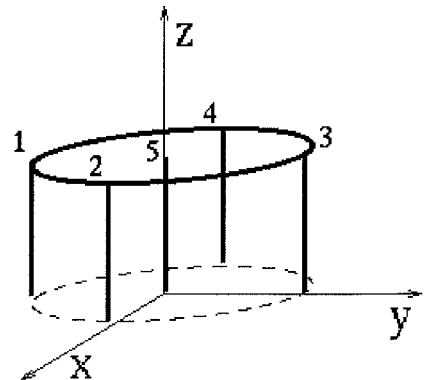
$$w_{ast}(r) = \frac{1}{450} r^2 \sin 2\theta,$$

waarbij r, θ de poolcoördinaten zijn die het vlak van de spiegel beschrijven.

Totaal specificatie en tolerantie

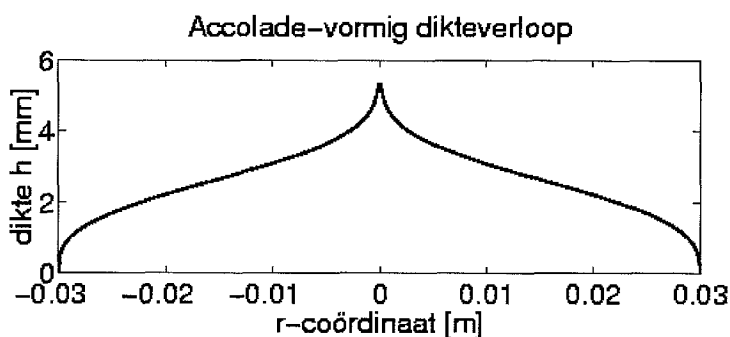
De uiteindelijke eis aan de vervormbare spiegel is, dat deze elke gewenste combinatie van vervormingen kan realiseren, waarbij de bovengenoemde formules voor deze vervormingen w_{def} en w_{ast} de maximale amplitude aangeven. Als tolerantie voor de vervormingen is gekozen voor 2 % van de maximale amplitude van de astigmatische vervorming, dus 40 nm. Bij gebruik van een He-Ne laser als lichtbron, met een golflengte $\lambda=633$ nm, komt dit overeen met $\lambda/16$; dit is een veelgebruikte vuistregel voor toleranties in optische systemen.

Omdat primair de vervormingen bestudeerd worden, zijn de eisen aan de vorm van de spiegel in onvervormde toestand minder stringent dan bovengenoemd. Toch zal ten behoeve van het verkrijgen van een goede optische meting van het oppervlak aan enkele eisen moeten worden voldaan: voor de vlakheid is een tolerantie van $0,2 \mu\text{m}$ gesteld, terwijl voor de oppervlakteruwheid een RMS-waarde van 3 nm wordt nagestreefd.

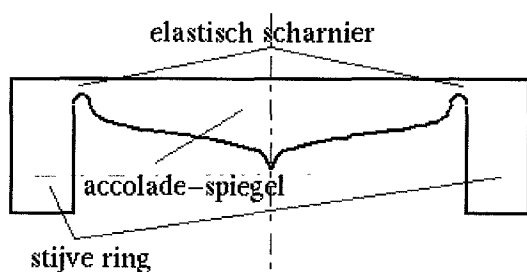


Figuur 3 Schematische weergave actuatorlocaties

Piezo-aangedreven vervormbare spiegel



Figuur 4. Ideaal dikteprofiel voor vervormbare spiegel



Figuur 5. Doorsnede van de vervormbare spiegel (schematisch)

Conceptkeuze

In het vakgebied van de actieve optica zijn verschillende basistechnieken bekend [1,2]. Zo worden in de astronomie, waar spiegels met een zeer grote diameter (bijvoorbeeld 10 m) toegepast worden, gesegmenteerde spiegels veelvuldig toegepast. De verschillende segmenten kunnen dan meestal in drie richtingen (axiaal en twee tilt-richtingen) gepositioneerd worden, zodat de optische eigenschappen van het geheel aangepast kunnen worden. De niet-gesegmenteerde spiegels bestaan meestal uit een relatief dun vervormbaar lichaam, dat vervormd wordt door een aantal actuatoren.

Er valt een belangrijk onderscheid te maken tussen zonaal en modaal vervormbare spiegels.

Bij zonaal vervormbare spiegels is meestal sprake van een groot aantal (> 10) actuatoren, geplaatst in een soort matrixstructuur, waarbij elke actuator slechts zonaal, in één bepaald gebied, de spiegel vervormt. Dit betekent, dat voor het aanbrengen van een eenvoudige modale vervorming, zoals de parabolische vervorming van figuur 1, alle actuatoren aangestuurd zullen moeten worden. Bij modaal vervormbare spiegels is dit niet het geval. In principe wordt de spiegel zo geconstrueerd, dat slechts één actuator nodig is om één bepaalde modale vervorming te realiseren.

Het nadeel van modaal vervormbare spiegels is, dat de constructie zeer complex wordt indien het aantal modale vervormingen toeneemt.

Actuatorplaatsing

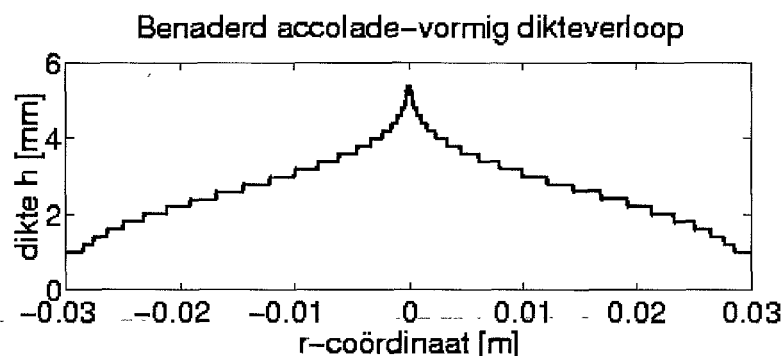
Omdat bij de gegeven specificaties slechts twee modale vervormingen hoeven te worden gerealiseerd, is het concept van de modaal vervormbare spiegel als uitgangspunt gekozen. Strikt genomen zouden dus slechts twee actuatoren nodig zijn, die elk één van de vervormingen aanbrengen. Het nadeel is dan echter, dat de positie (in verplaatsingsrichting) en de oriëntatie van de spiegel niet instelbaar zijn. Bovendien is een speciale constructie vereist, om de vervorming voor astigmatisme te realiseren met één enkele actuator. Daarom is er gekozen voor een concept met vijf actuatoren, één in het midden, en vier aan de omtrek van de spiegel, zoals geïllustreerd in figuur 3. Door een juiste aansturing van de actuatoren kan de spiegel zowel vervormd als gepositioneerd worden. In tabel 1 is een overzicht gegeven van de benodigde actuatorsturingen (positief, negatief, of nihil) voor de verschillende positioneer- cq. vervormingsacties. Merk op, dat in deze tabel de positionering en de vervorming van de spiegel ontkoppeld zijn, indien alle actuatorsturingen gelijke amplitude hebben.

Actuator	1	2	3	4	5
Verplaatsing in z-richting	+	+	+	+	+
Rotatie om x-as	-	0	+	0	0
Rotatie om y-as	0	+	0	-	0
Vervorming defocus	+	+	+	+	-
Vervorming astigmatisme	+	-	+	-	0

Tabel 1. Actuatoraansturingen voor positionering en vervorming.

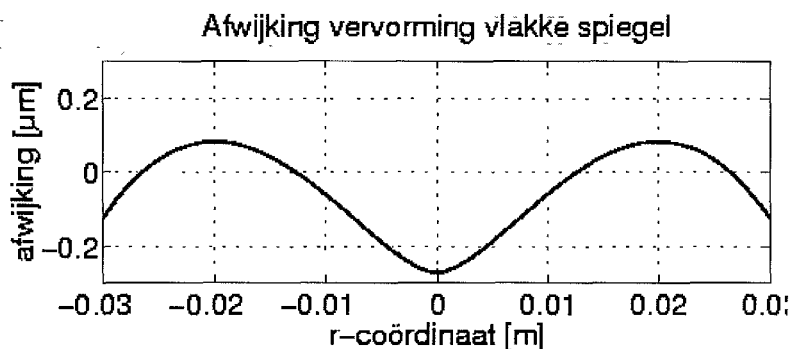
Spiegelvorm

Hoewel met de actuatorplaatsing volgens figuur 3 de spiegel hol of bol, en ook in een zadelvlakvorm gezet kan worden, is een vervorming volgens de specificaties (zie de formules voor w_{def} en w_{ast}) nog niet gegarandeerd. De uiteindelijke vervorming hangt namelijk af van de vorm van de spiegel, en van de wijze van bevestiging van de actuatoren. De meest elementaire oplossing, die vaak gevonden wordt in de literatuur van adaptieve optica [1,2], is een dunne vlakke plaat, waarop de actuatoren (geïdealiseerd) puntkrachten uitoefenen. Echter, deze oplossing geeft een niet-parabolische vervorming, zoals later zal worden aangetoond. Daarom is gekozen voor een 'accolade-



Figuur 6 Benaderd dikteprofiel, gebruikt in berekeningen

Figuur 7 Afwijkingen van ideale defocus-vervorming voor vlakke spiegel



vormig' dikteprofiel voor de spiegel, zoals getoond in figuur 4, beschreven door de formule

$$h = h_0 \sqrt{\ln(r/r_0)},$$

met $h_0=3,5$ mm en $r_0=30$ mm. Dit dikteprofiel is door Sluijmer analytisch afgeleid uit de differentiaalvergelijkingen van de vervorming van een ronde, niet-vlakke plaat, belast met een kracht in het middelpunt [4].

Omdat de rand van de spiegel zeer dun moet zijn om het gekozen dikteprofiel te benaderen, is het moeilijk de actuatoren direct aan de spiegel te bevestigen.

Bovendien is het gewenst, dat de krachten van de vier omtreksactuators goed verdeeld over de omtrek in de spiegel geleid worden, om randeffecten ten gevolge van complexe spanningsverdelingen rond de actuators te voorkomen. Daarom wordt de spiegel voorzien van een stijve ring aan de omtrek, met een elastische scharnierverbinding tussen spiegel en ring. Zie figuur 5 voor een schematische weergave van deze constructie. De elastische verbinding heeft een lage rotatiestijfheid, hiermee wordt voorkomen, dat er momenten op de rand van de spiegel inwerken

Door de actuators op de omtrek om en om positief en negatief aan te sturen, zal de stijve ring vervormen, deze 'golfvormige' vervorming levert een verplaatsing op aan de rand van de spiegel, die daarmee in een zadelvorm gezet wordt.

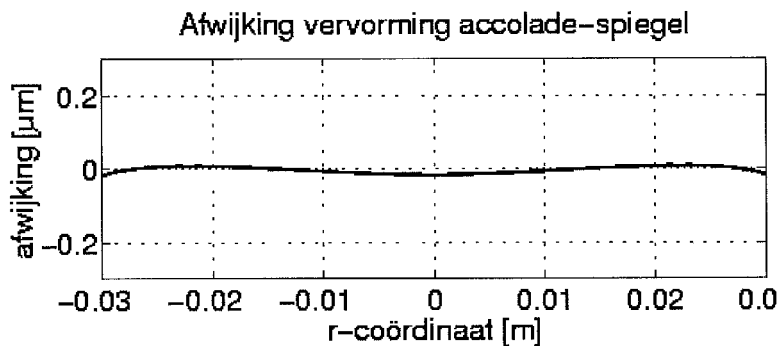
Modelvormings-resultaten

Ter onderbouwing van de conceptkeuze, met name de keuze voor het accolade-vormig dikteprofiel van de spiegel, zijn beschikbare theoretische modellen [5,6] geïmplementeerd in het rekenpakket Matlab. Deze modellen zijn gebaseerd op de theorie van de vervorming van een dunne, vlakke, ronde plaat. Menkoff [5] beschrijft voor dit geval de vervormingen onder invloed van een willekeurig aantal actuators, op willekeurige posities geplaatst. Wan et al [6] breiden dit model uit voor het geval dat de dikte niet constant, maar wel cirkelsymmetrisch is. Daarbij wordt de ronde plaat opgedeeld in een beperkt aantal ringen met verschillende dikte, zodat een willekeurig dikteprofiel kan worden benaderd. Voor de accolade-vorm van figuur 4 is deze benadering gegeven in figuur 6.

Bij de uitgevoerde berekeningen is met name gekeken naar de invloed van de accolade-vorm op de vervorming voor defocus. Met andere woorden, in hoeverre de gewenste vervorming van figuur 1 beter benaderd wordt dankzij de accolade-vorm. Omdat de spiegel flexibel bevestigd is aan de stijve ring, is aangenomen dat er slechts een verdeelde kracht aan de omtrek van de spiegel heerst, terwijl de rand verder vrij is. Verder grijpt in het midden een kracht aan, gelijk aan de integraal van de verdeelde belasting aan de omtrek. In figuur 7 is het verschil gegeven tussen de ideale defocus vervorming van figuur 1 en de berekende vervorming voor een vlakke ronde spiegel met dikte $h=3,5$ mm. Hetzelfde verschil voor de (benaderde) accoladevorm van figuur 6 is gegeven in figuur 8. Duidelijk is te zien, dat door de accolade-vorm de gewenste vervorming beter gerealiseerd wordt.

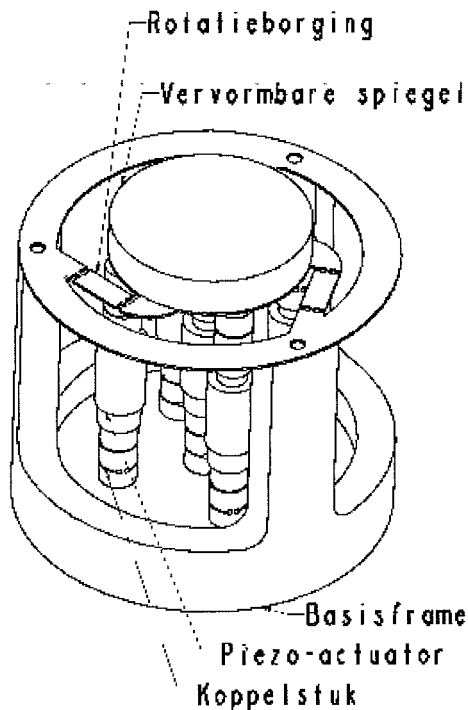
Realisatie en toekomstig onderzoek

Teneinde aan de gestelde eisen voor de onvervormde spiegel te voldoen, wordt de spiegel na voorbereiding gepolijst. In verband met deze bewerking is ervoor gekozen, een laag Ni-Cr van 150 µm op het basismateriaal te zetten; ten behoeve van een goede hechting wordt zuurstofvrij koper als basismateriaal gebruikt.



Figuur 8 Afwijkingen van ideale defocusvervorming voor spiegel met accolade-vormig dikteverloop

Hoewel de spiegel zelf niet erg stijf is (ongeveer $6 \text{ N}/\mu\text{m}$ in het midden), is de ring zeer stijf gedimensioneerd met een hoogte van 17 mm en een breedte van 10 mm wordt een effectieve stijfheid op de actuatorlocaties gevonden van $60 \text{ N}/\mu\text{m}$. Om er voor te zorgen dat de gegenereerde verplaatsingen van de piezo-actuatoren goed overgedragen worden op de stijve ring, zullen de actuatormodules voldoende stijf moeten zijn. Gekozen is voor stijve, voorgespannen, laagspannings piezo-actuatoren. Hun maximale uitwijking is $15 \mu\text{m}$, de te leveren kracht ligt tussen -700 en 3000 N , terwijl de stijfheid $200 \text{ N}/\mu\text{m}$ bedraagt. Omdat dwarskrachten en koppels op actuatoren moeten worden vermeden, worden nog koppelstukken tussengevoegd, zowel boven als onder de actuator, die in



Figuur 9 Samenstelling van vervormbare spiegel, piezo-actuatoren, koppelstukken, en basisframe

buigingsrichting flexibel zijn. Om te voorkomen dat de effectieve actuatorstijfheid (inclusief koppelstukken) kleiner wordt dan $100 \text{ N}/\mu\text{m}$, zijn de koppelstukken zodanig gedimensioneerd, dat hun stijfheid (per stuk) in axiale richting minimaal $100 \text{ N}/\mu\text{m}$ bedraagt. Het geheel van spiegel en actuatoren is bevestigd op een basisframe, waarbij een borgingsring de overgebleven vrijheidsgraden van de spiegel fixceert. In figuur 9 is een samenstellingstekening te zien.

Als de vervormbare spiegel constructief gerealiseerd is, zal het onderzoek zich richten op de aansturing van de piezo-actuatoren. In het bijzonder zal daarbij de interactie tussen de verschillende actuatoren worden onderzocht. Voor verschillende aansturingen van de piezo-actuatoren zullen de vervormingen van het spiegeloppervlak worden gemeten met behulp van een zogenaamde Fizeau interferometer, die een interferentiepatroon van het oppervlak genereert. Uit deze metingen kan het vervormingsgedrag van de spiegel worden geïdentificeerd, waarna een actief regelsysteem kan worden ontwikkeld, rekening houdend met de interactie tussen de actuatoren.

Noot

Dit artikel berust grotendeels op het afstudeerwerk 'Ontwerp van een vervormbare spiegel' van A.L. Sluijmer, vernicht aan de Universiteit Twente. Hij werd bij dat afstudeerwerk begeleid door prof.dr.ir. M.P. Koster van de Universiteit Twente en door prof.dr.ir. J.J.M. Braat van de Technische Universiteit Delft, die een belangrijke bijdrage leverden aan de mechanische respectievelijk de optische aspecten van dit werk.

Literatuur

- [1] Hardy, J.W. Active Optics. A New Technology for the Control of Light. Proc. IEEE, 66(1978)6, pp.651-697.
- [2] Freeman, R.H. en J.E. Pearson. Deformable mirrors for all seasons and reasons. Applied Optics, 21(1982)4, pp.580-588.
- [3] Hecht, E. Optics 2nd edition, Addison-Wesley Publishing Co., 1990.
- [4] Sluijmer, A.J. Ontwerp van een vervormbare spiegel. Afstudeer-rapport WA-524, Universiteit Twente, Fac. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Werktuigkundige Automatisering, April 1997.
- [5] Menikoff, A. Actuator influence functions of active mirrors. Applied Optics, 30(1991)7, pp.833-838.
- [6] Wan, D.S., J.R.P. Angel en R.E. Parks. Mirror deflection on multiple axial supports. Applied Optics, 28(1989)2, pp.354-362.2.