

Ontwerpopdracht Constructieprincipes

Opleiding Fijnmechanische techniek / Mechatronica
Hogeschool van Utrecht

Ellart A. Meijer
April 2004

Inhoud

1. Vast te leggen vrijheidsgraden	4
Overzicht van vrijheidsgraden:	4
Principeoplossingen	4
Tangentiele sprietten	5
2. Lensgeleiding	6
Dubbele bladveer	6
Parallelgeleiding	6
3. Vastgelegde vrijheidsgraden	7
XY-vlak en rotatie om Z:	7
Rotatie om X en Y	7
Overbepaaldheid	7
4. Overbrengverhouding	8
De verhouding	8
5. Constructie	9
Constructie-uitleg	10
6. Bewijs constructie	13
Eigenfrequentie	13
Kantelstijfheid	14

Ontwerpopdracht "constructieprincipes"

De in figuur (1) afgebeelde beweegbare lens maakt deel uit van een objectief waarvan het brandpunt instelbaar is met de bedoeling scherp te stellen op een oppervlak. Aan de buitenkant van de koker waarbinnen zich het stelsel lenzen bevindt, is een servomotor met overbrenging gemonteerd. De uitgaande beweging daarvan is een axiale beweging ($H(t)$) met een slag van circa 10mm. De instelnaauwkeurigheid van deze, met gesloten lus geregelde, servomotor is circa 2 micrometer. Het ontwerpprobleem omvat twee aspecten:

- 1) het ontwerp van een ophanging voor de beweegbare lens
- 2) een overbrenging tussen de axiale (z-)beweging van de lens en de uitgaande beweging $H(t)$ van de motor

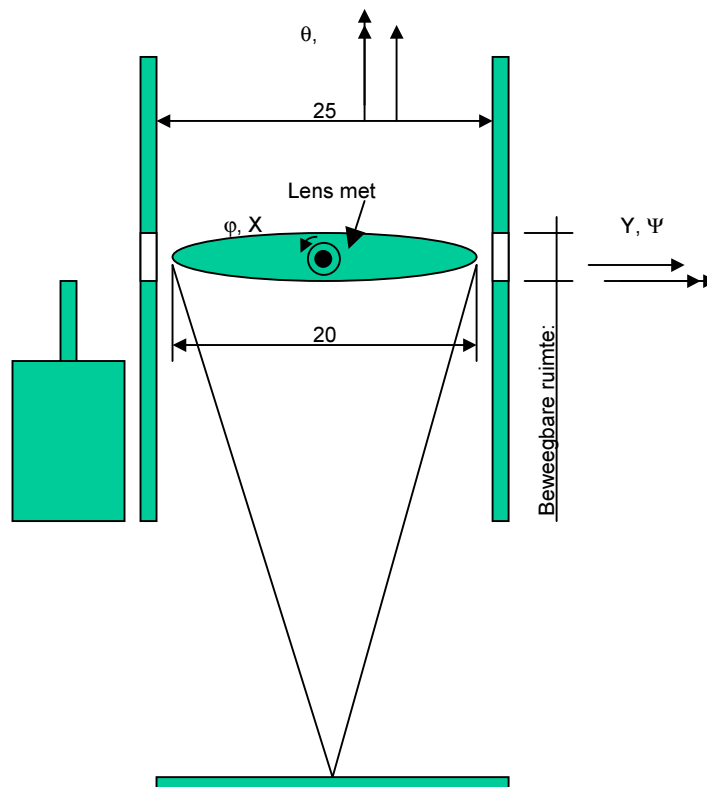
Eisen:

- slag van de lens: 0.1mm
- massa lens: 1kg
- instelnaauwkeurigheid in Z: 100nm
- kanteling lens max.: 10^{-6} rad
- dwarsverplaatsing hartlijn: 100nm
- stijve ophanging lens
- Eigenfrequenties in x en y: 100Hz

Vragen:

1. Welke coördinaten moeten worden vastgelegd
2. Vind (een) configuratie(s) voor een lensgeleiding die aan de specificaties kan voldoen. Geef deze configuratie(s) weer in voldoende schetsen, bij voorkeur in Amerikaanse projectie.
Aanwijzing: denk aan elastische elementen
3. geef aan op welke wijze de respectievelijke coördinaten zijn vastgelegd
4. vind een overbrengingsverhouding tussen de servomotor $H(t)$ en de lenshouder en bepaal de overbrengingsverhouding
5. geef, in Amerikaanse projectie, een ontwerp van de meest veelbelovende configuratie van de lensophanging en de aandrijving. In figuur (1) is de ruimte aangegeven die voor de constructie beschikbaar is: $Z=40$ mm. Buiten de koker van 250mm mag worden geconstrueerd
6. toon aan dat het ontwerp aan de eisen voldoet

figuur (1)



1. Vast te leggen vrijheidsgraden

Uitgangspunt van de gevraagde oplossing is een statisch bepaalde constructie. Om daartoe te komen wordt een lijst van bewegingsvrijheid opgesteld.

Overzicht van vrijheidsgraden:

De lens moet kunnen bewegen in Z, de optische as. Een kleine hoekverdraaiing om deze (optische) as is, door de rotatie symmetrie van de lens, niet erg. De overige vrijheidsgraden, translatie in X en Y en de rotatie om deze assen φ en Ψ , moeten worden vastgelegd.

Vastgelegd moeten zijn:

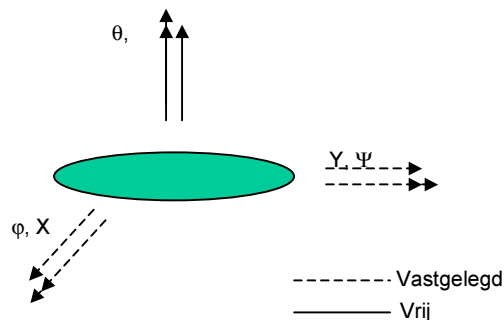
- Translatie in X en Y
- Rotatie om φ en Ψ

Vastgelegd mag worden:

- rotatie om θ

Vrij actueelbaar moet zijn:

- Translatie in Z



Principeoplossingen

Om de constructie statisch bepaald te construeren maken we gebruik van sprieten en bladveren. Specifieke eigenschappen zijn de volgende:

Een spriet legt 1 graad van vrijheid vast, de lengterichting

Een bladveer twee lengterichtingen

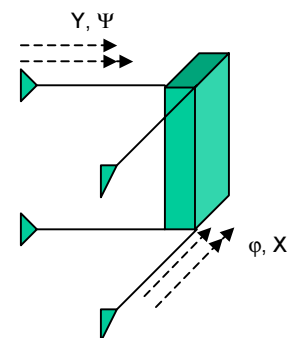
Een ingesnoerde bladveer een rotatie en een lengterichting

Een gevouwen bladveer is vergelijkbaar met een spriet, legt dus 1 translatie vast.

De lenzgeleiding kan ontworpen worden naar een aantal basisconstructies die een gedefinieerd aantal vrijheidsgraden vastlegt. Toepasbare configuraties op basis van sprieten zijn:

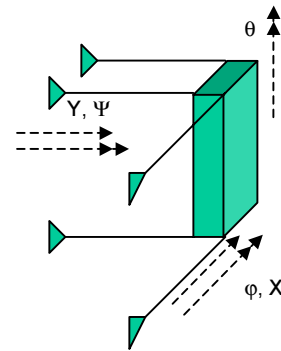
4 vrijheidsgraden; twee lengtes en twee hoeken:

De lengte as is vrij als ook de rotatie om deze as. Dit is alleen bruikbaar als de rotatie met het hart van de lens samenvalt.



5 vrijheidsgraden; twee lengtes en drie hoeken

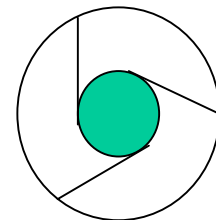
Hierbij is ook de rotatie om Z vastgelegd.



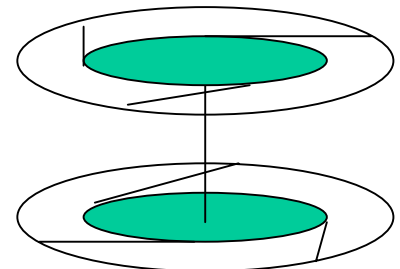
Omdat het hier om een rotatiesymmetrisch product gaat kan het denken in oplossingen al wel wat in een richting gestuurd worden:

Tangentiele sprieten

Tangentiele sprieten definiëren van een hartlijn in de ruimte, leggen hierbij twee translaties vast in het vlak en een rotatie om de hartlijn.



Wordt deze constructie opgezet naar de sprietenconstructie hiervoor worden alle drie de rotaties vastgelegd en twee translaties in de beide vlakken van de sprieten. In translatie blijkt de constructie dus overbepaald, XY worden twee keer vastgelegd.



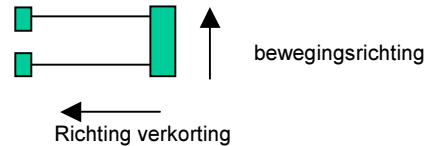
In plaats van sprieten kunnen ook gevouwen bladveren worden gebruikt, deze legt ook slechts een vrijheidsgraad vast

2. Lensgeleiding

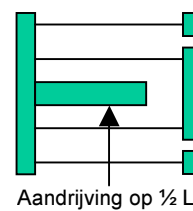
Dubbele bladveer

Dwarsverplaatsing: verkorting spriet door dubbele buiging:

Parallel geleiding met waarbij door vervorming van de sprieten er een verplaatsing optreedt haaks op de bewegingsrichting van het te geleiden object



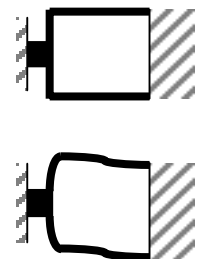
Sprietconstructie voor grotere slag, zonder verkorting:



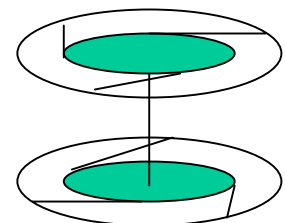
Parallelgeleiding

In plaats van sprieten kan een parallelgeleiding ook worden uitgevoerd met bladveren. De verkorting die ook optreedt in de horizontale bladveer bij beweging van de lenshouder wordt opgevangen door de buiging van de verticale.

De verticale veren kunnen worden gedimensioneerd naar de gevraagde eigenfrequentie in het XY-vlak zonder de Z-richting te beïnvloeden.



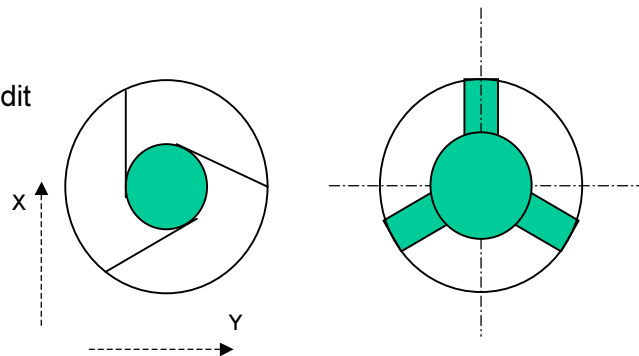
Gebruikmakend van de tangentele sprieten zou de constructie er uit kunnen zien als de hiernaast afgebeelde figuur. Het feit dat de lens niet als torsieslap lichaam kan fungeren vraagt een oplossing voor de overbepaaldheid die hierdoor optreedt in het XY-vlak.



3. Vastgelegde vrijheidsgraden

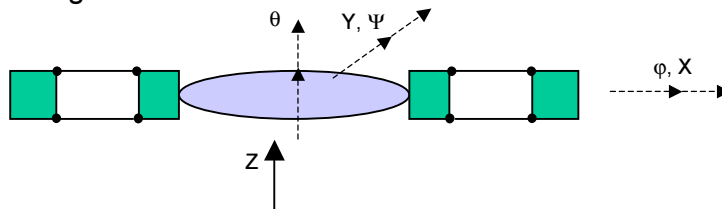
XY-vlak en rotatie om Z:

Tangentiele sprieten leggen beweging in dit vlak vast. Uitgevoerd als sprieten of gevouwen bladveer.



Rotatie om X en Y

Een parallelgeleiding van de hierboven geschetste tangentele oplossingen moet voor voldoende kantelstijfheid zorgen.



Overbepaaldheid

Bij het dubbel uitvoeren van circulaire constructies als hierboven geschetst sluipt er als snel een overbepaaldheid in. De vraag is natuurlijk of dit onoverkomelijke bezwaren oplevert. Soms is een symmetrische constructie uiteindelijk netter dan een met moeilijke oplossingen statisch bepaald gemaakte.

4. Overbrengverhouding

De lens moet over een kleiner gebied en met een veel hogere nauwkeurigheid worden bewogen dan de uitgaande as van de motor aanbiedt. Tussen de motor en de lens moet daarom een overbrengingsverhouding worden geconstrueerd.

De verhouding

Er moet met twee overbrengingen rekening gehouden worden, te weten de slag en de resolutie.

Slag:

De benodigde overbrenging om van een ingaande slag van 10mm van de motor naar een uitgaande slag van 0.1mm van de lens is: $10 \div 0.1 = 100 \div 1$

Resolutie:

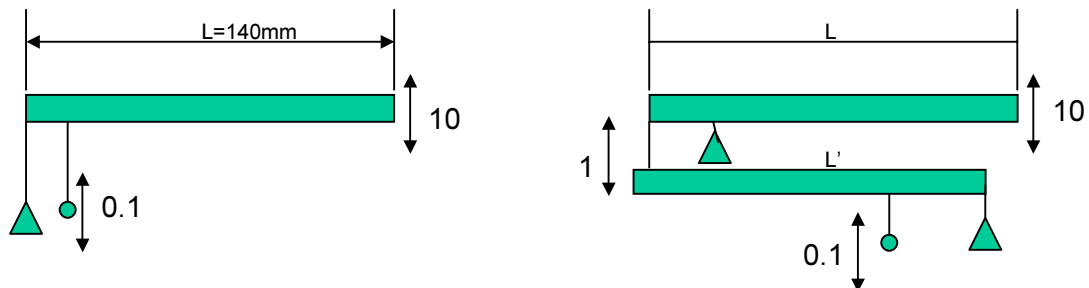
De motor heeft een resolutie van $2\mu\text{m}$, er wordt een instelnauwkeurigheid van 100nm gevraagd. Dit komt op: $2\mu\text{m} \div 0.1\mu\text{m} = 20 \div 1$

Nu hoeft de volledige slag van de motor niet te worden gebruikt. Als er voorzichtig wat rekening wordt gehouden met buigslapte in de hefboom moet een overbrenging van $40 \div 1$ ruim voldoende zijn.

Na de overbrenging van $40 \div 1$ wordt de instelnauwkeurigheid bij oneindige stijfheid: $2/40 = 0.05\mu\text{m}$. Dit is ruim (een factor 2x) binnen het gevraagde.

Uitvoering

Deze overbrenging kan in één trap worden gerealiseerd of in meerdere:

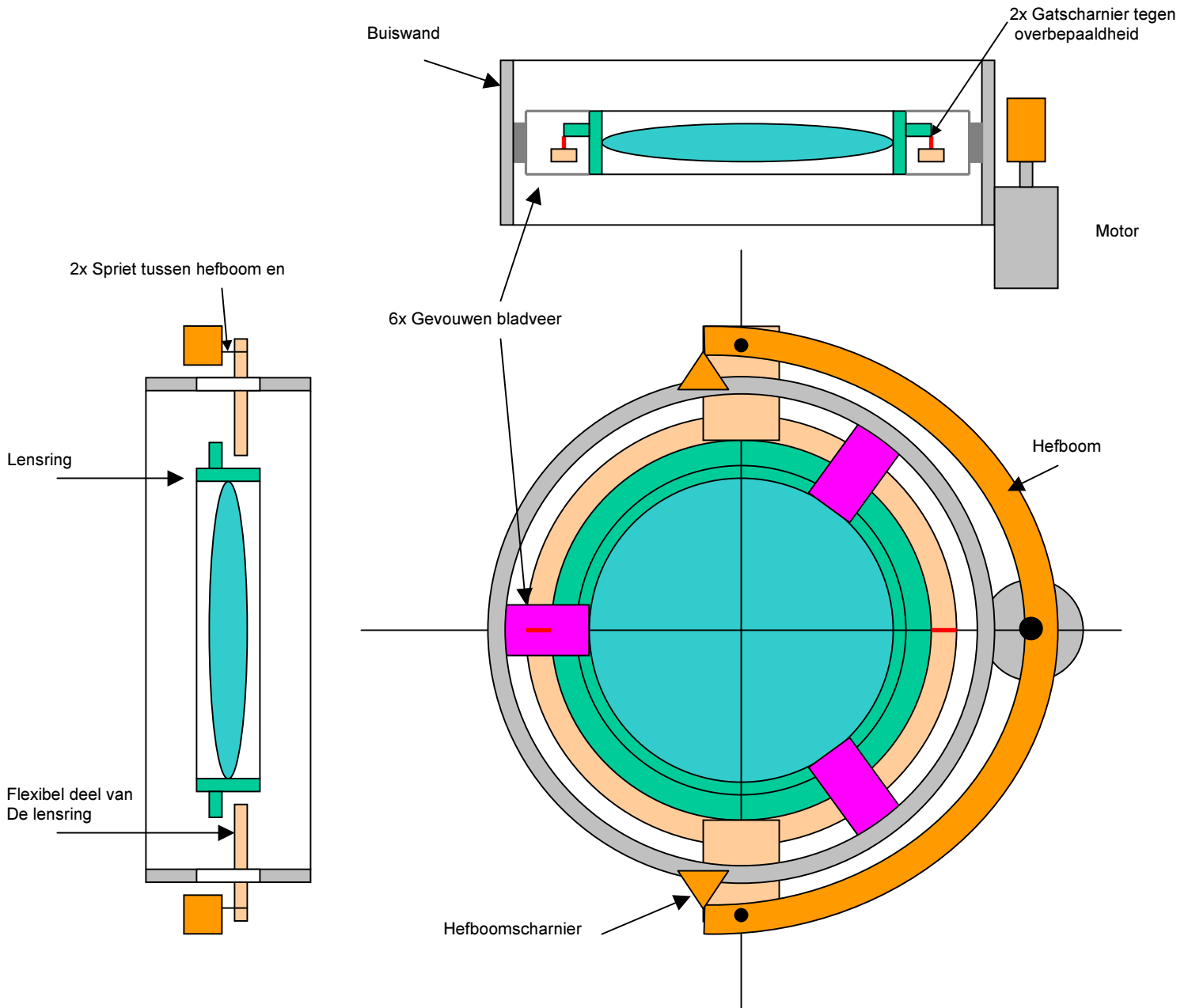


Met een hart op hart afstand van de motor tot de lens van 140mm is een overbrenging van $40 \div 1$ eenvoudig haalbaar met een hefboom verhouding van 140:3.5.

De hoekverdraaiing die het scharnier voelt is 0.03 graden.

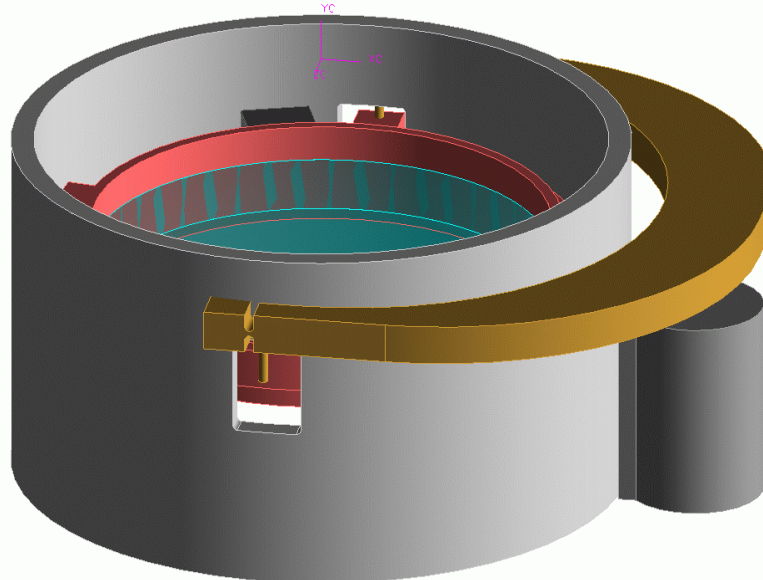
5. Constructie

De meest veelbelovende constructie gaat bestaan uit een 6-tal gevouwen bladveren. Deze dienen om de lenshouder te centrerin in de buis en als parallelgeleiding voor de Z-instelling van de lens. De hefboom wordt om de buiswand geleid en met een gatscharnier draaibaar aan de buiswand bevestigd. De hefboom drijft de lens in Z-richting aan.



Constructie-uitleg

De lens is gevat in een stevige ring waaraan zes gevouwen bladveren zijn bevestigd. Een verstijfd deel op het verticale deel wordt vastgemaakt aan de dragende buis. De zes gevouwen bladveren geven een overbepaaldheid mee aan de lensgeleiding in het XY-vlak. De symmetrie van de constructie vind ik hier echter belangrijker wegen, deze zorgt voor een mooie krachtverdeling.

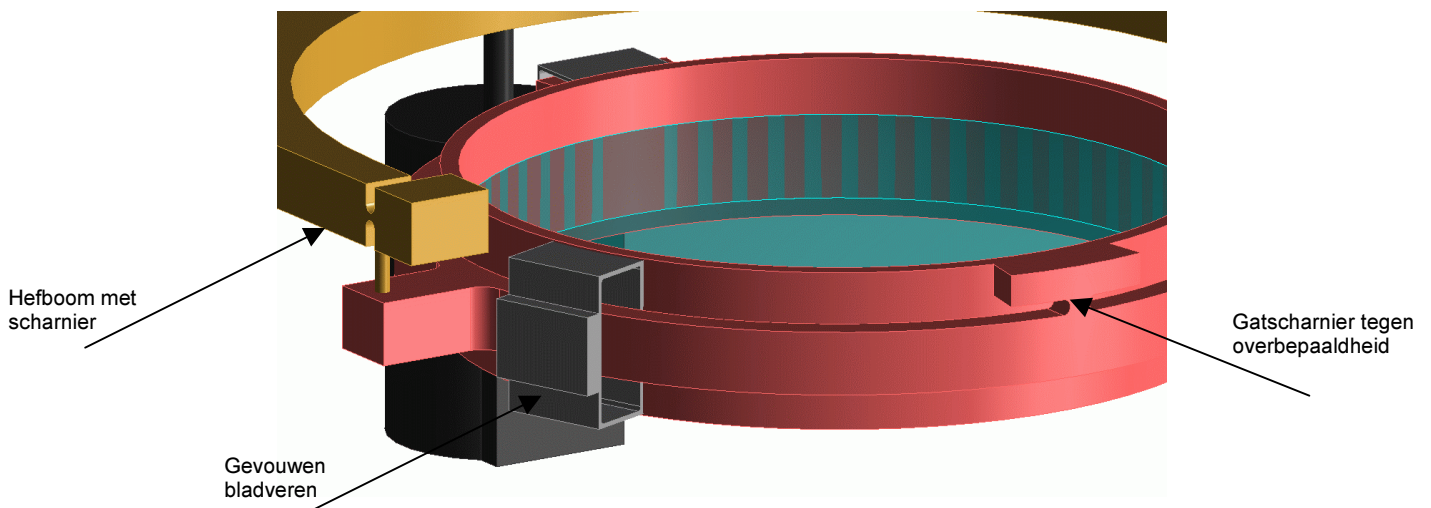


De U-vormige hefboom zit in vijf vrijheidsgraden vast. Slechts de rotatie om Y is vrij door de twee scharnieren aan de buiswand met de hefboom. De motor drijft de hefboom in het midden aan met een dunne spriet die alleen de Z-richting vastlegt.

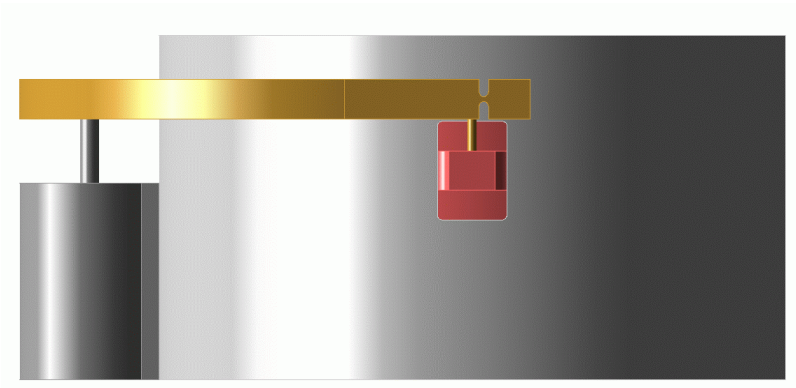
De koppeling van de hefboom met de lensgeleiding moet zorgvuldig gebeuren. De verhouding van de afstand tussen de parallelle bladveren en de diameter van de lens maakt dat een geringe stoorkracht een koppel zal introduceren wat ernstige bedreiging vormt voor de opgegeven maximale kanteling van de lens. Dit is de reden dat er gekozen is voor twee punten waarop de hefboom aangrijpt op de lensring. Zo lijkt het meer alsof je de lens in het zwaartepunt optilt. Het is nu alleen zo dat de aandrijving als geheel overbepaald is. De 5 vrijheidsgraden van de hefboom plus de twee van de aandrijving leggen er in totaal 7 op aan dit kritische deel van de lensgeleiding.

Overbepaaldheid

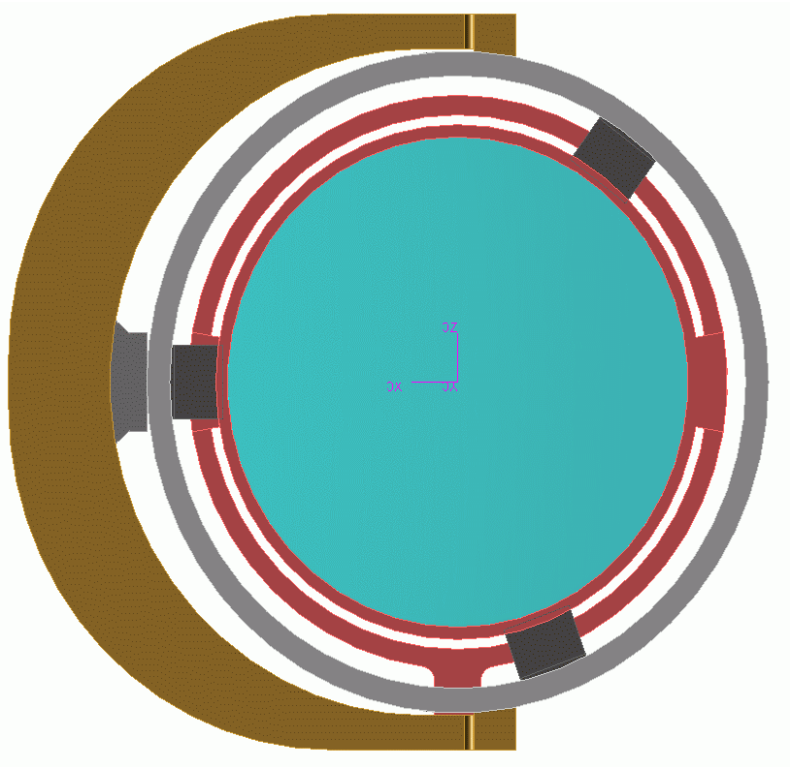
De overbepaaldheid in de lensaandrijving wordt opgeheven door in de lensring een rotatie vrij te geven. De rotatie-as staat haaks op de lijn over de twee aangrijpingspunten van de aandrijving.



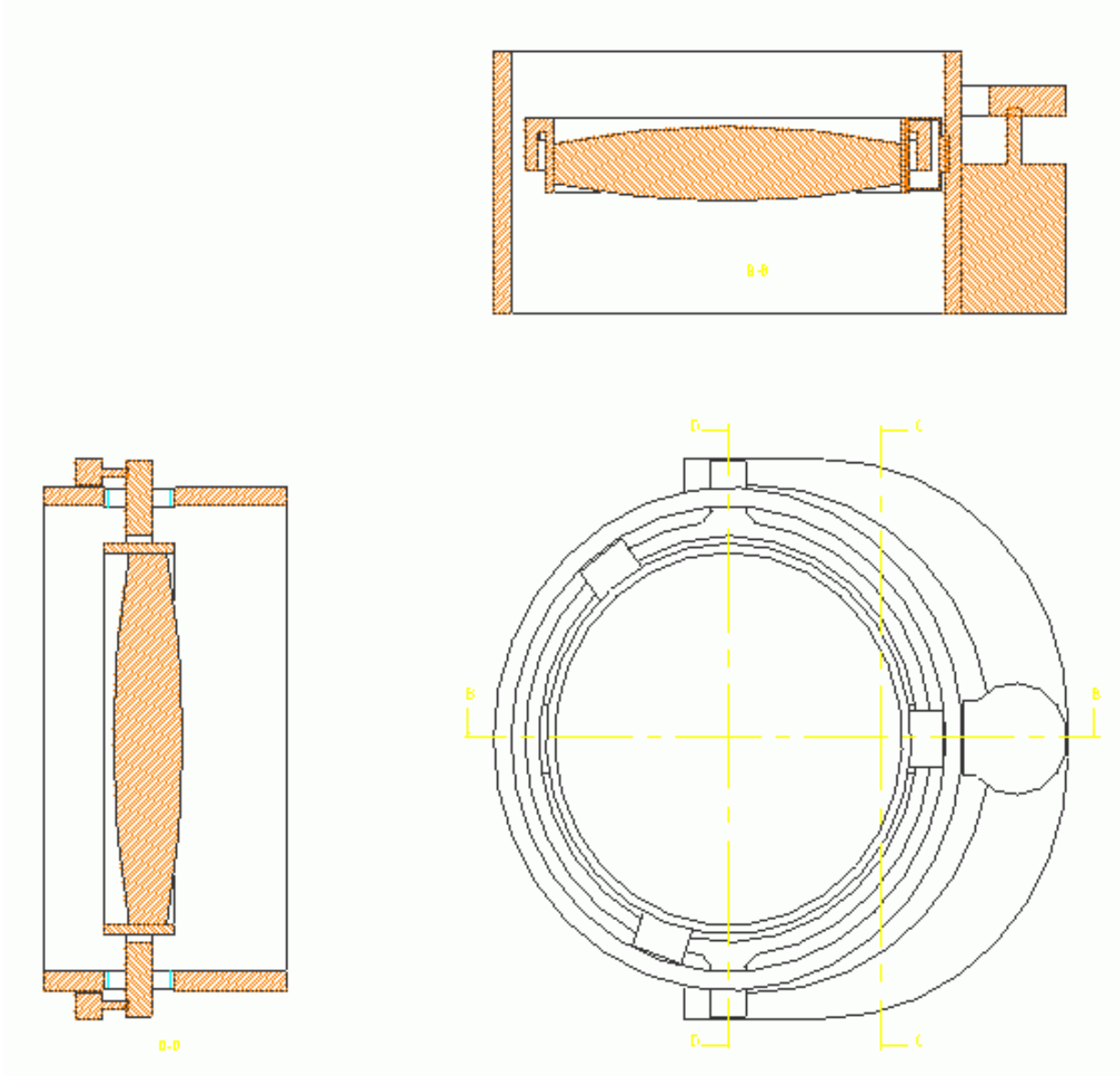
Zijaanzicht



Bovenaanzicht



Doorsneden van het model



6. Bewijs constructie

Eigenfrequentie

De massa van de lens is 1kg, hier komt nog wat gewicht van de houder bij. Laten we voor de houder voorlopig ca 300 gram nemen dan:

$$m = 1.3 \text{ [kg]}$$

$$F_e = 100 \text{ [Hz]}$$

$$\omega_e = 2 \cdot \pi \cdot F_e = 2 \cdot \pi \cdot 100 = 628 \text{ [rad/s]}$$

$$\omega_e = \sqrt{c/m} \Rightarrow c = \omega_e^2 \cdot m \Rightarrow c = 628^2 \cdot 1.3 = 513 \text{ kN/m}$$

De vereiste stijfheid van de geleiding in het XY-vlak om de lens vast te houden is 513N/mm.

Dit wordt bereikt met zes bladveren in een configuratie van 2x 3x120°. De buigstijfheid van 3 veren onder 120° is vergelijkbaar met die van twee veren parallel met dezelfde afmetingen. De veren kunnen dus berekend worden naar een vervangende veerstijfheid van 2x 2 veren parallel:

$$c = E b h^3 / 12 l$$

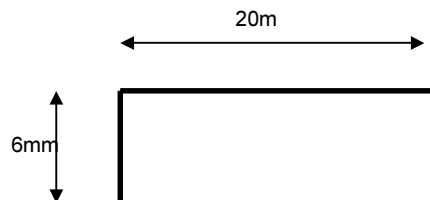
$$E_{\text{staal}} = 210 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$$

$$b = 15 \text{ mm}$$

$$h = ? \text{ mm}$$

$$l = 6 \text{ mm}$$

$$c_{\text{min}} = 513/4 =$$



$$h_{\text{min}} = \sqrt[3]{(128 \cdot 12 \cdot 6 / 210 \text{E}3 \cdot 15)} = 0.14 \text{ mm}$$

Met een dikte van 0.2mm komt de stijfheid per veer op: $c = 350 \text{ N/mm}$

Deze veerstijfheid x4 geeft 1400N/mm.

De eigenfrequentie die hiermee gehaald kan worden is: $\omega_e = (c/m)^{-2} = 1037 \text{ [rad/s]}$ dat is 165Hz

Voor de lange (horizontale) bladveer geldt het moeten kunnen dragen van de 1.3kg zware lens met een dubbele buiging van de bladveren. De stijfheid van de bladveer in zijn eigen vlak zal vele malen hoger zijn dat die van de verticale veren en zullen dus niet van invloed zijn op de minimale eigenfrequentie.

In deze richting tellen alle bladveren gewoon mee, de veerstijfheid per veer moet berekend worden op $1.3/6 = 0.22 \text{ kg}$. Maximale zakking ten gevolge van het eigen gewicht wordt gesteld op 0.02mm

De veerstijfheid c per bladveer wordt dan minimaal: $c = F/u = 2.2 \text{ N} / 0.02 \text{ mm} = 110 \text{ N/mm}$

Veerstijfheid van een dubbelbuigende bladveer:

$$c = E b h^3 / l^3$$

De bladveerafmetingen hier:

$$b = 15 \text{ mm}$$

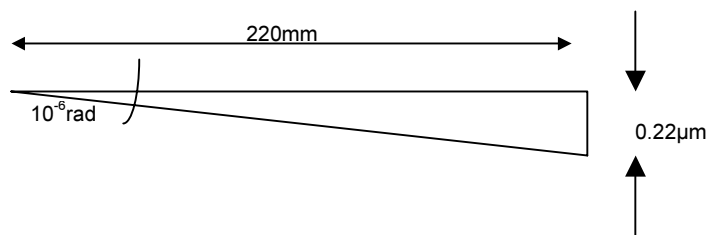
$$h = .6 \text{ mm}$$

$$l = 18 \text{ mm}$$

$$c = 117 \text{ N/mm}$$

Kantelstijfheid

De hartlijn van de lens mag maximaal 10^{-6} radiaal verdraaien. Dit betekent dat de lens niet meer dan $0.22\mu\text{m}$ mag zakken aan een kant terwijl de andere wordt vastgehouden.

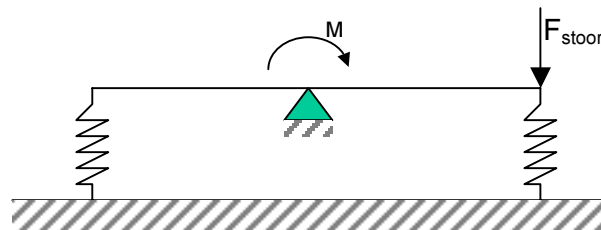


Met een veerstijfheid van 116/veer mag er maximaal een stoormoment op de lensgeleiding worden uitgeoefend van:

$$f_{\text{zakking}} = 0.22 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$c_{\text{bladveer}} = 6 \times 116 = 700 \text{ N/mm}$$

$$F = c \cdot f = 15.4 \text{ N}$$



De kracht die nodig is om de lens met houder op te tillen is $13 \text{ N} + 0.05 \text{ mm} \cdot 700 \text{ N/mm} = 48 \text{ N}$

Het is dus goed dat de lens op twee plaatsen wordt opgetild!

Met de stijfheid van de hefboom kan naar believen worden gespeeld door wijzigingen aan afmeting.