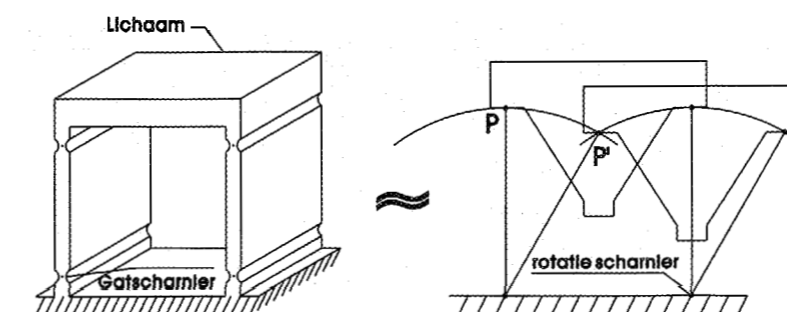


Monolitische rechtgeleiding

Nauwkeurig bewegen in het nanometer-gebied

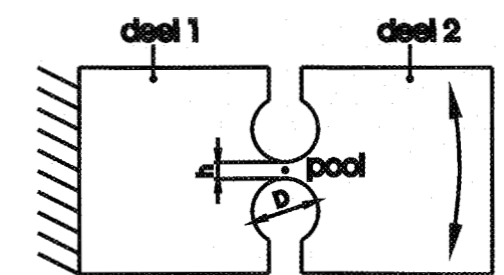
Johan van Seggelen, Raimond Dumoulin. **Monolitische rechtgeleiding met gatscharnieren, waarvan de beweging overeenkomt met die van een ideaal vierstangenmechanisme met gelijke pootlengten, blijken uitermate geschikt voor toepassingen waarin een evenwijdige verplaatsing op micrometerschaal wordt gevraagd. Maar omdat de nauwkeurigheidseisen gestaag toenemen, werd het van belang het bewegingsgedrag van dit type rechtgeleiding in het nanometer-gebied te onderzoeken. Bij de Gemeenschappelijke Technische Dienst van de Technische Universiteit Eindhoven wordt bij de bouw van experimentele opstellingen vaak een dergelijke monolitische rechtgeleiding toegepast. Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van een afstudeerproject van de auteurs aan de opleiding Fijnmechanische Techniek aan de Hogeschool van Utrecht.**

Figuur 1. Overeenkomsten tussen een monolitische rechtgeleiding op basis van gatscharnieren en een ideaal vierstangenmechanisme met gelijke pootlengten. Links een monolitische rechtgeleiding op basis van gatscharnieren, rechts een ideaal vierstangenmechanisme met gelijke pootlengten



Een monolitische rechtgeleiding is eenvoudig voor te stellen door een tafel die in één richting wankel op zijn poten staat. Wanneer de tafel in deze richting wordt aangestoten, maakt het tafelblad een evenwijdige beweging ten opzichte van de 'vaste wereld'. Een monolitische rechtgeleiding wordt uit één stuk materiaal vervaardigd waardoor beweging alleen dan mogelijk is wanneer de poten vervormen. Door het aanbrengen van gatscharnieren die plaatselijke de stijfheid van de poten te verlagen, kan deze vervorming gecontroleerd plaatsvinden en daarmee de gewenste beweging worden verkregen. De beweging van de monolitische rechtgeleiding op basis van gatscharnieren wordt verondersteld overeen te komen met de beweging van een ideaal vierstangenmechanisme met gelijke pootlengten. Kenmerkend voor zo'n ideaal vierstangenmechanisme is dat alle punten van het lichaam een cirkelbaan

doorlopen. De kromming van deze cirkelbaan is afhankelijk van de lengte tussen de scharnierpunten. Bij het monolithisch vierstangenmechanisme zijn de vier scharnierpunten, zoals weergegeven in figuur 1, vervangen door vier identieke gatscharnieren. Een gatscharnier wordt toegepast met als doel het scheppen van één graad van vrijheid door hoekverdraaiing of het opheffen van een overbepaaldheid. De geometrie die dit mogelijk maakt ontstaat door het aanbrengen van twee gaten (gatdiameter D) op geringe afstand van elkaar (damhoogte h) in een plaat (dikte t) of een massief blok materiaal. Door het aanbrengen van zaagsneden ontstaat de mogelijkheid dat deel 2 ten opzichte van deel 1 kan roteren, zie figuur 2. Dit roteren wordt verondersteld te gebeuren om een punt dat aangeduid wordt als de pool van het gatscharnier.



Figuur 2. Schematische weergave van een gatscharnier

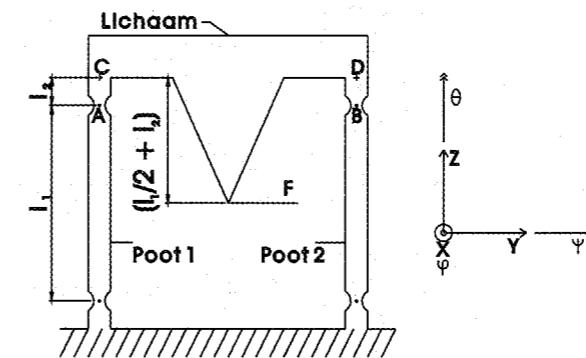
Nauwkeurig bewegen in het nanometer-gebied

Door het aanbrengen van dergelijke gatscharnieren in de poten van een monolitische rechtgeleiding, ontstaat er een spelingvrije, wrijvingsloze en hysteres-arme constructie die in de vrijgegeven richting een gecontroleerde beweging met zeer hoge positie-nauwkeurigheid kan maken. De slag van deze beweging wordt beperkt door de elastische vervorming die het materiaal aankan en is dus afhankelijk van de geometrie van het gatscharnier en de rek-grens van het materiaal.

Ontwerp testmodel

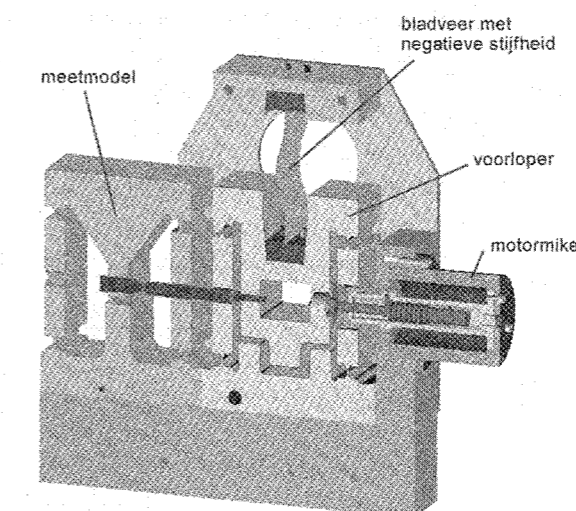
Om de nauwkeurigheid van de beweging te onderzoeken is een testmodel ontworpen en vervaardigd. De beweging van het testmodel wordt tot stand gebracht door een verplaatsing op te leggen in een lijn halverwege de polen van de gatscharnieren, zie

Figuur 3, loodrechte aansturing op halve lengte tussen de polen van de gatscharnieren



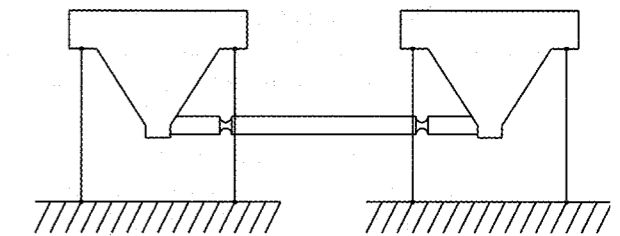
figuur 3. Daarmee wordt een gelijke belasting op de linker en rechter poot bereikt zodat een zo zuiver mogelijke evenwijdige beweging ontstaat. Er zijn talloze wijzen waarop een verplaatsing kan worden aangebracht. Een nadeel van de monolitische

Figuur 5. Het testmodel met bijbehorende technische gegevens.



rechtgeleiding is echter dat deze tijdens de beweging richting vaste wereld zakt. Wanneer heel precieze bewegingen gewenst zijn, dan moeten kleine verschillen in elastische vervorming worden vermeden. Deze verschillen ontstaan door verschillen in belasting op de elastische elementen, en ontstaan doordat de aandrijfkraft niet op de juiste plaats en niet in de juiste richting is aangebracht.

Om de beweging onder alle omstandigheden zo ideaal mogelijk aan te sturen, moet de verplaatsing loodrecht op de geleiding worden aangebracht. Daarom wordt gebruik gemaakt van een tweede identiek model (de voorloper) dat verbonden wordt aan het eerste model (het meetmodel) door een buigslappe spriet, zie figuur 4. De spriet is buigslap gemaakt om een eventueel verschil in zakking tussen het meetmodel en de voorloper op te vangen.



Figuur 4, Het systeem, het meetmodel gekoppeld aan de voorloper door een buigslappe spriet.

De voorloper functioneert ook als 'buffer' om aandrijfkraften op te vangen. Het meetmodel dat door de buigslappe spriet gekoppeld is aan de voorloper wordt aangeduid met het begrip 'het systeem'.

Testmodel	
- lengte	300 [mm]
- breedte	115 [mm]
- hoogte	325 [mm]
- materiaal	34CrNiMo6
- massa	50 [kg]

Gatscharnier parameters	
- gatdiameter meetmodel	16 [mm]
- damhoogte meetmodel	0,5 [mm]
- gatdiameter voorloper	16 [mm]
- damhoogte voorloper	0,3 [mm]
- lengte tussen de polen	100 [mm]

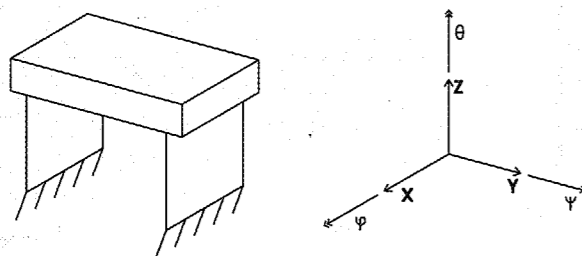
Aandrijving	
- motormike	
- besturing	AC 220 ~ 50 Hz
Spriet	
- insnoer diameter	0,6 [mm]
- lengte tussen insnoeringen	70 [mm]
- Bladveer	
- breedte	95 [mm]
- dikte	0,7 [mm]
- aandrukkracht	2250 [N]

Voorloper en meetmodel worden door draadvonken uit één stuk materiaal vervaardigd. Dit geheel wordt aangeduid met het begrip 'het frame'.

Er is een aandrijving gebruikt die al bij de Gemeenschappelijke Technische Dienst aanwezig was, te weten 'de motormike'. De motormike bestaat uit een motor met reductiekast die een schroefspil met een spoed van 0,5 mm aandrijft. Een nadeel van deze motormike is dat de axiale kracht, die nodig is om het systeem aan te drijven, te groot is voor de spil. De meest wenselijke toestand zou het ontbreken van een axiale belasting zijn. Een constructie met negatieve veerijfheid is toegevoegd om dit te realiseren. Door een bladveer gecontroleerd te knikken kan er energie in worden opgeslagen. Hierdoor ontstaat een opstelling, die met een zeer geringe kracht kan worden verplaatst. Het systeem kan nu met enkele Newtons worden aangedreven, wat acceptabel is voor de motormike. Het uiteindelijke testmodel met bijbehorende technische gegevens is weergegeven in figuur 5.

Bewegingsrichtingen

Het lichaam van het meetmodel kan een beweging maken in de richting die door de gatscharnieren in de poten wordt vrijgegeven. Deze richting wordt hier

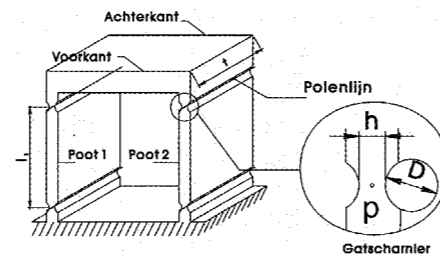


Figuur 6. Bewegingsrichtingen van het lichaam van het Meetmodel.

de ij-richting genoemd. Naast deze verplaatsing kunnen er nog afwijkingen van deze beweging optreden en wel een translatie in x-richting of een zakking in z-richting. Verder zijn er nog afwijkingen in de vorm van rotaties mogelijk, te weten: een hoekverdraaiing (θ) om de x-as, een hoekverdraaiing (ψ) om de ij-as en een hoekverdraaiing (θ) om de z-as. De bewegingsrichtingen van het lichaam van het meetmodel zijn weergegeven in figuur 6.

Vooronderzoek

Voordat een onderzoek naar de bewegingen van het meetmodel wordt gestart, is eerst nagedacht over de oorzaken die voor mogelijke afwijkingen van de ideale beweging zorgen. Bewegingsafwijkingen zullen



Figuur 7. Parameters die afwijkingen in de geometrie van het meetmodel kunnen veroorzaken.

hoofdzakelijk veroorzaakt worden doordat het model na productie, zie figuur 7, afwijkt van het ideale model. Dit zijn onder andere:

- onderling verschil in damhoogten (h);
- onderling verschil in gatdiameters (D);
- verloop van de damhoogte (h) over de damdikte (t);
- onderling verschil in damdikten (t);
- onderling verschil in de lengte (l_1) tussen de polen van poot 1 en poot 2;
- afwijkingen in de vorm en / of onderlinge positie van de polenlijnen. Onder polenlijn wordt de denkbeeldige lijn verstaan waarop de polen van een gatscharnier worden verondersteld te liggen.

De parameters (h, D en t) van het gatscharnier hebben invloed op de rotatiestijfheid. Wanneer de rotatiestijfheid van de vier gatscharnieren van het meetmodel onderling verschilt, dan mag worden verondersteld dat het meetmodel afwijkingen ten opzichte van zijn theoretische bewegingsrichting zal vertonen. Hierbij dient te worden opgemerkt dat niet elke parameter evenveel invloed heeft op de rotatiestijf-

	Damhoogte (h)	Gatdiameter (D)	Damdikte (t)
Nominale maat	0,5 mm	ϕ 16 mm	100 mm
Afwijking van de nominale maat	0,05 mm	0,05 mm	0,05 mm
Afwijking van de nominale maat in %	10 %	0,3 %	0,05 %
Verandering in de rotatiestijfheid	27 %	0,15 %	0,05 %

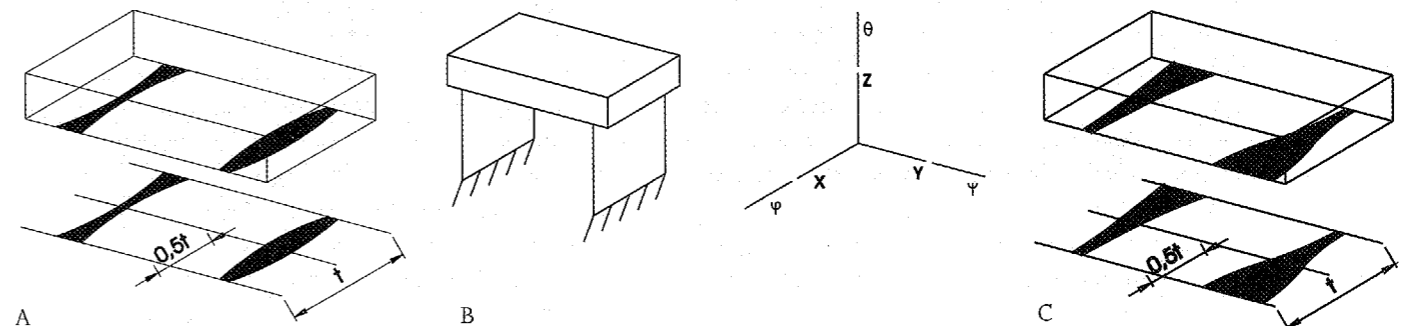
k_ϕ Rotatiestijfheid van een gatscharnier [Nm.rad ⁻¹]
E Elasticiteitsmodulus [Pa]
h Damhoogte van het gatscharnier [m]
D Gatdiameter van het gatscharnier [m]
t Damdikte van het gatscharnier [m]

$$k_\phi = \frac{0,093 \times E \times t \times h^{2,5}}{\sqrt{D}} \text{ [Nm.rad}^{-1}\text{]}^{-1}$$

Tabel 1. Resultaten van het onderzoek naar de verandering van de rotatiestijfheid van de gatscharnieren van het meetmodel ten gevolge van mogelijke afwijkingen van het ideale model die ontstaan tijdens de productie.

heid van een gatscharnier. Het is daarom van belang voor elke parameter te onderzoeken in welke mate de rotatiestijfheid zal veranderen, wanneer een parameter door onnauwkeurigheid bij de productie een afwijkende waarde heeft gekregen.

Figuur 8. voorbeeld van een symmetrisch / asymmetrisch verloop van de damhoogte (h) over de damdikte (t). Symmetrisch verloop van de damhoogte (h) over de damdikte (t). Asymmetrisch verloop van de damhoogte (h) over de damdikte (t).



Uit de gegevens in tabel 1 blijkt dat de afwijkingen van de ideale rechte beweging hoofdzakelijk afkomstig zullen zijn uit:

- het onderling verschil in damhoogte (h)
- het verloop in damhoogte (h) over de damdikte van de gatscharnieren.

Wanneer de damhoogte van de gatscharnieren onderling verschilt zal het lichaam tijdens het bewegen in de vrijgegeven richting een hoekverdraaiing om de x-as maken.

De bewegingsafwijking die ontstaat door het verloop van de damhoogte (h) is afhankelijk van de vorm van dit verloop, zie figuur 8. Is dit verloop symmetrisch ten opzichte van de lijn ter hoogte van een

halve damdikte, dan zal het lichaam tijdens het bewegen in de vrijgegeven richting een hoekverdraaiing om de x-as maken. Is dit verloop echter asymmetrisch ten opzichte van de lijn ter hoogte van een halve damdikte dan zal het lichaam tijdens het bewegen naast de hoekverdraaiing om de x-as ook nog een hoekverdraaiing om de z-as maken.

De verandering van het bewegingsgedrag door afwijkingen in de gatdiameter (D) en de damdikte (t) is, zoals blijkt uit tabel 1, verwaarloosbaar. Wanneer er onderling verschil in de lengte tussen de polen van poot 1 op poot 2 optreedt, zal het lichaam tijdens het bewegen in de vrijgegeven richting, net zoals bij onderling verschil tussen de damhoogten, een hoekverdraaiing om de x-as maken.

Doordat gebruik is gemaakt van een draadvonkmachine wordt er verwacht dat de lengte tussen de polen van de gatscharnieren veel minder gevoelig zal zijn voor afwijkingen dan de damhoogten van de

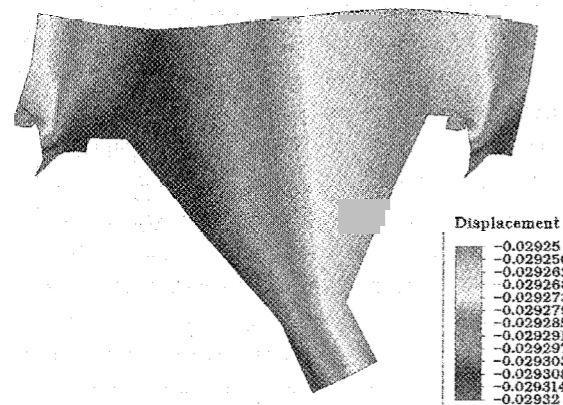
gatscharnieren. Vandaar dat afwijkingen die ontstaan door het verschil in lengte tussen de polen van poot 1 en poot 2 buiten beschouwing wordt gelaten.

Tot slot dient nog in gedachten gehouden te worden dat er afwijkingen in het bewegingsgedrag kunnen optreden wanneer de vorm en / of de onderlinge positie van de polenlijnen afwijkingen vertonen. Theoretisch levert dit een complexe situatie op, reden waarom deze analyse afhankelijk van de resultaten van de metingen, zonodig later zal worden uitgevoerd.

Metingen

Het onderlinge verschil in de damhoogten (h) en het verloop van de damhoogte (h) over de damdikte (t) bij de gatscharnieren van het meetmodel is gemeten. Dit is gedaan door contourmetingen aan de gatdiameters (D) van de gatscharnieren van het meetmodel uit te voeren. Uit deze metingen bleek dat bij alle gatscharnieren een ongedefinieerd verloop in de contour van de gatdiameter aanwezig was. Daarnaast is er door metingen met een digitale schuifmaat, tussen de damhoogten van de gatscharnieren onderling, een maximale afwijking van ongeveer 10 % geconstateerd. Met deze bevindingen kon worden veronder-

Figuur 9. Vervorming van het lichaam van het meetmodel. De vervorming in Z-richting is 100.000 maal vergroot weergegeven.



steld dat het meetmodel van dit frame totaal niet voor onderzoek in het nanometergebied geschikt zou zijn. Vandaar dat in een vroeg stadium is besloten om een nieuw frame te fabriceren, onder de meest ideale omstandigheden. Om beide frames te kunnen onderscheiden wordt gebruik gemaakt van de begrippen: het oude en het nieuwe frame.

Het oude frame is een frame waarvan de geometrie in één keer aan de maat is gevonkt. Het vonken in het dit frame heeft ongeveer één week geduurd.

Bij het nieuwe frame is de geometrie niet in één keer, maar drie opeenvolgende cycli gevonkt voordat de gewenste maat werd bereikt. Dit voor en navonken is onder een hoek van 30 ten opzichte van het ij-z assenstelsel gebeurd, zie figuur 6, zodat de eventuele omkeerspelg op de spullen van de draadvonkmachine niet ter plaatse van de dammen in de gatscharnieren doorlopen zou worden.

Het nieuwe frame is onder ideale omstandigheden vervaardigd. De kans dat de Gemeenschappelijke Technische Dienst alsnog een frame kan fabriceren met nog kleinere afwijkingen ten opzichte van de gedefinieerde geometrie is daardoor uit te sluiten.

Omdat de fabricage van het nieuwe frame enkele weken in beslag zou nemen is er toch gestart met het onderzoek naar de nauwkeurigheid van de beweging van het oude frame. De metingen mochten echter niet zomaar op een willekeurige plaats aan het lichaam worden uitgevoerd, want in het nanometergebied kan elke vervorming, hoe klein dan ook, invloed hebben op de metingen. Om de maximale vervorming tijdens het doorlopen van de slag te kunnen schatten is een simulatie met het eindige elementenpakket Algor uitgevoerd.

- Uit deze simulatie (zie figuur 9) bleek dat bij maximum slag:
- het bovenvlak in een 's-bocht' vervormde bij verplaatsing van het lichaam uit de evenwichtsstand. (Deze vervorming zal bij een beweging in tegengestelde richting ook tegengesteld zijn. Wat hier top is wordt dan dal en omgekeerd.);
 - het verschil tussen top en dal bij deze simulatie ongeveer 28 nm is;
 - in dit plaatje drie punten zijn aan te wijzen die,

Hoekverdraaiing (φ) om de X-as	Evenwijdigheid lichaam ten opzichte van de vaste wereld	Productiewijze
φ ≈ 2°	≈ 1 μm	Geometrie in 1 x aan de maat vonken
1° < φ < 2°	0,5 1 μm	Voor- en navonken onder een hoek van 30°
φ < 1°	< 0,5 μm	Niet mogelijk

tijdens het doorlopen van de slag, ten opzichte van elkaar nauwelijks invloed van de vervorming zullen ondervinden.

Uit deze resultaten kon worden opgemaakt dat de beste plaats voor het uitvoeren van de metingen

boven de gatscharnieren of in het midden van het lichaam is.

Om een indicatie te krijgen van de afwijkingen van de ideale beweging, zijn meettasters gebruikt. Een dergelijke meetopstelling is relatief simpel op te bouwen en heeft weinig last van omgevingsinvloeden. Hieruit bleek al snel dat de zakking in z-richting het enig meetbare resultaat was. Bij alle overige bewegingen was de meetonnauwkeurigheid vele maten groter dan de meetwaarde zelf. Voor de overige metingen is daarom gebruik gemaakt een autocollimator en laserinterferometrie.

Evaluatie meetresultaten

Als eerste kan uit de metingen worden geconcludeerd dat de baan van het lichaam een verwaarloosbare afwijking vertoont ten opzichte van de cirkelbaan van een ideaal vierstangenmechanisme met gelijke pootlengten. Over de totale slag is een afwijking in de orde grootte van 0,25m gemeten op de berekende zakking van 31m (afwijking kleiner dan 1%). De hoekverdraaiing van het lichaam om de x-as ligt ongeacht de wijze van draadvonken over de totale slag in de orde grootte van 2°. Het lichaam blijft dan over de totale slag binnen ongeveer 1m evenwijdig ten opzichte van de 'vaste wereld'. Wordt er voor- en nagevonkt onder een hoek van 30°, dan ligt deze hoekverdraaiing over de totale slag in een gebied tussen 1° en 2°. Het lichaam blijft dan over de totale slag evenwijdig in een gebied dat ligt tussen 0,5m en 1m ten opzichte van de vaste wereld. Voor een hoekverdraaiing kleiner dan 1° of met andere woorden een evenwijdigheid van het lichaam kleiner dan 0,5m ten opzichte van de vaste wereld is het meetmodel niet geschikt, zie tabel 2.

Uit de metingen blijkt dat de vervorming van het lichaam van het meetmodel nog zeer grote invloed heeft op de afwijkingen van de ideale baan. Beide modellen tonen een 's-bocht' vervorming aan het bovenvlak bij verplaatsing uit het midden, hetgeen blijkt uit eindige elementen berekeningen. In beide gevallen (meetmodel van het oude en meetmodel van het nieuwe frame) is er over de totale slag een verschil van ongeveer 1° tussen de minimum en maximum hellingshoek van de vervorming aan het bovenvlak gemeten.

De beweging in x-richting is moeilijk te meten in het nanometer-gebied. Dit omdat scheefstand van het meetmodel ten opzichte van de meetapparatuur invloed op de meting heeft. Daarnaast is geconstateerd dat bij het meetmodel van het oude frame torsie van het lichaam om de ij-as optreedt. Bij het meetmodel van het nieuwe frame komt deze torsie echter niet meer voor.

De hoekverdraaiing om de Y-as wordt verondersteld over de lengte van het lichaam constant te zijn in de orde grootte van 1°. Tenslotte blijkt bij het meetmodel van het oude frame een hoekverdraaiing om de Z-as in de orde grootte van 2,5° op te treden. Bij het meetmodel van het nieuwe frame is deze hoekverdraaiing, ten opzichte van het oude meetmodel, met ongeveer een factor 2 is gereduceerd tot een afwijking in de orde grootte van 1,2°.

De metingen waarop deze conclusies zijn gebaseerd, zijn voldoende nauwkeurig uitgevoerd, omdat ruis en drift relatief klein waren ten opzichte van de gemeten waarden.

Conclusies en aanbevelingen

Als hoge eisen aan een monolitische rechtgeleiding (parallelgeleiding) gesteld worden, dan is het aan te raden deze te simuleren met een eindige elementenpakket. Zo kan worden nagegaan of de afwijkingen van de ideale beweging en de vervormingen van de geleiding toelaatbaar zijn. Tevens kan worden gecontroleerd (parasitaire)krachten en spanningen binnen de perken blijven.

De geleiding volgt een cirkelbaan en veroorzaakt een zakking richting vaste wereld. Uit de meetresultaten blijkt dat afwijking van de voorspelde zakking als te verwaarlozen klein mag worden beschouwd.

Ook is het verstandig de monolitische rechtgeleiding op een zodanig wijze te construeren dat slechts een geringe aanstuurkracht nodig is en het lichaam een zo groot mogelijke stijfheid in alle bewegingsrichtingen bezit. Op deze wijze kunnen de afwijkingen in de beweging door vervorming van het lichaam worden geminimaliseerd.

Tevens dient goed nagedacht te worden over de nauwkeurigheid waarmee de geleiding wordt vervaardigd.

Zeer nauwkeurig en extreem duur produceren geeft nauwelijks verbetering in de nauwkeurigheid van de beweging.

Nauwkeurig bewegen in het nanometer-gebied

Wanneer desondanks extreem nauwkeurige productie vereist, dan wordt aanbevolen de geleiding voor- en na te vonken onder een hoek van ongeveer 30° ten opzichte van het hoofdasstelsel van de gatscharnieren. Zo ontstaan slechts zeer geringe maatafwijkingen ten opzichte van de gedefinieerde contour en wordt voorkomen dat de vonkmachine zijn omkeerspelings doorloopt ter plaatse van de dammen in de gatscharnieren.

Literatuur

PC.J.N. Rosielle, E.A.G. Reker; TUE dictaat *Constructieprincipes I* Bedoeld voor het nauwkeurig bewegen en positioneren; Faculteit Werktuigbouwkunde, sectie Precision Engineering, Eindhoven 1996.

Noot

Dit onderzoek is in het kader van een afstudeeropdracht uitgevoerd bij de stafgroep Constructie en Technologie van de Gemeenschappelijke Technische Dienst aan de Technische Universiteit Eindhoven. Dit ter afsluiting van de opleiding Fijnmechanische techniek aan de Hogeschool van Utrecht.

Voor nadere informatie: Gemeenschappelijke Technische Dienst van de Technische Universiteit Eindhoven, Ir. E.C.A. Dekkers, tel.: (040) 247 3356, e-mail: E.C.A.Dekkers@tue.nl.
Hogeschool van Utrecht, studievariant Fijnmechanische Techniek, Ir. H.W. Croon, tel.: (030) 230 8108, e-mail: h.croon@it.fnt.hvu.nl
Auteurs: Ing. J.K. van Seggelen, tel.: (0495) 491336, e-mail: J.K.v.Seggelen@student.tue.nl en Ing. R.L. Dumoulin, tel.: (0495) 496232, e-mail: R.L.Dumoulin@student.tue.nl