

che draaitafel

Aandrijving

in ultrahoog vacuüm

E. de Haas, W. Barsingerhorn en J.F. van der Veen

Een compacte, nauwkeurige, piëzo-elektrisch aangedreven draaitafel is ontwikkeld voor bedrijf in ultrahoog vacuüm. Het aandrijfmechanisme bestaat uit twee gecombineerde knijp- en duwbewegingen. Het koppel van de aandrijving bedraagt 0,7 Nm. De tafel kan links- en rechtsom draaien in stapjes van 1,3 milligrad, met een maximum snelheid van een omwenteling per twee minuten.

Inleiding

Piezo-elektrische elementen worden op grote schaal toegepast als verplaatsingsmechanisme in wetenschappelijke apparatuur, vooral in microscopen van het 'scanning probe' type [1]. Ook worden ze vaak gebruikt voor het nauwkeurig positioneren van objecten en voor het instellen van spiegels. Piezo-elektrische aandrijvingen kunnen op twee manieren werken: als stootmechanisme, gebaseerd op het gecombineerde effect van wrijving en traagheid [2] ('tafellaken'-effect) of als een mechanisme dat stapt door gesynchroniseerde fasen te doorlopen van achtereenvolgens klemmen en transleren. Voorbeelden van het laatste zijn de 'luis' [3] en de 'spanrups' [4].

In dit artikel beschrijven wij een draaitafel met een nieuw type aandrijfmechaniek [5] dat berust op het 'spanrups'-principe. De tafel zal dienst doen als een van de draaicirkels van een speciale zesassige diffractometer van het 'kappa'-type [6]. Deze is thans in ontwikkeling ten behoeve van röntgendiffractie-experimenten met synchrotronstraling aan kristaloppervlakken in ultrahoog vacuüm [7,8].

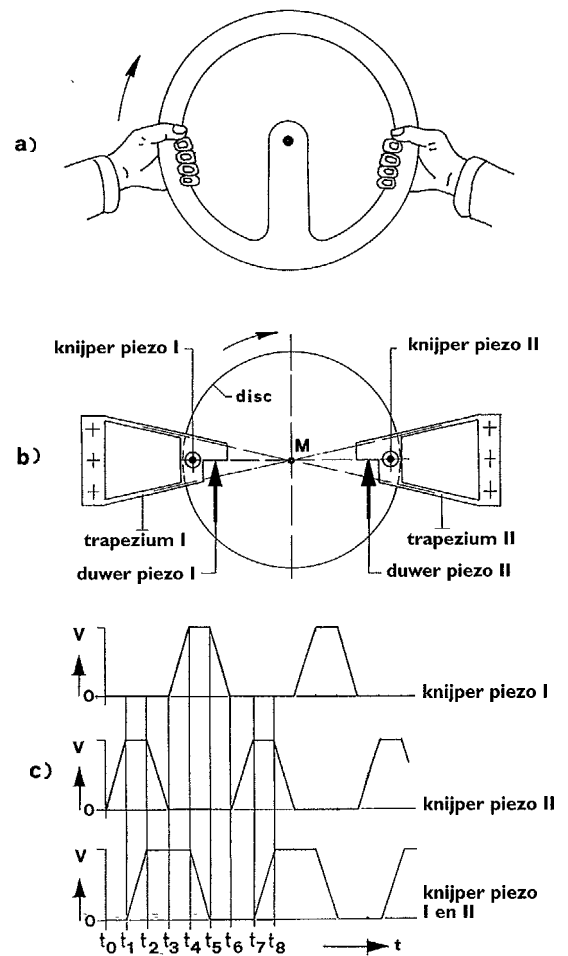
De draaitafel met aandrijving moet aan de volgende eisen voldoen.

- geschikt voor gebruik in ultrahoog vacuüm, dat wil zeggen uitstootbaar tot circa 150°C,
- hoekverdraaiing over 360°,
- stapgrootte en reproduceerbaarheid ≤ 1 milligrad,
- geschikt voor hoekuitlesing terplaatse,
- compact en licht van gewicht,
- groot koppel

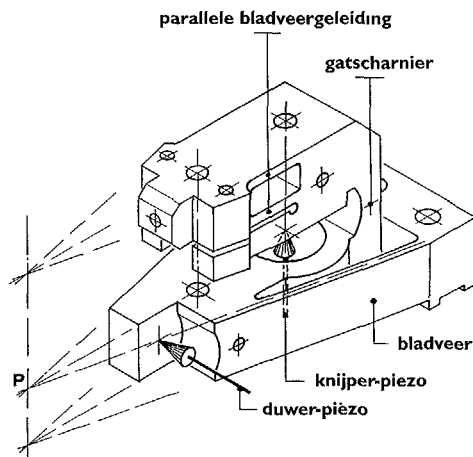
Werking

Twee piezo-elektrisch aangedreven meeneelementen draaien de tafel rond zoals wij door overpakken met onze handen een autostuur draaien, zie figuur 1a en 1b. Aan het verende uiteinde van elk meeneelement zit een verende knijper. De knijper wordt bediend door een piezo-element, de knijper-piezo, die bij inschakeling van de spanning een aan de tafel bevestigde schijf

los laat en en bij uitschakeling van de spanning de schijf vastklemt. De knijper wordt zijdelings verplaatst door een tweede piezo-element, de duwer-piezo. Bij bekrachtiging van een duwer-piezo beweegt de knijper-piezo van het betreffende meenelement in de richting van de pijl, zoals aangegeven in figuur 1b



Figuur 1 De piezo-elektrische aandrijving van de draaitafel (a) Overeenkomst met autostuurwiel (b) Boven-aanzicht van de schijf, met posities van de piezo-elementen. De knijper-piezo's werken loodrecht op het vlak van de schijf (c) Het tijdsverloop van de elektrische spanningen op de verschillende piezo-elementen



Figuur 2 Meenelement, bestaande uit verende trapezoïde en knijper

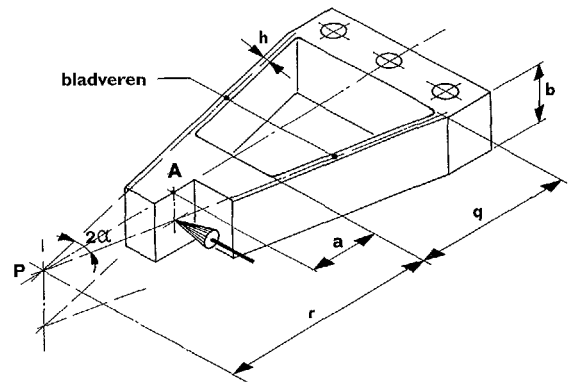
De schijf wordt aan het draaien gebracht door op de piezo's van de meenelementen elektrische spanningen te zetten die in de tijd variëren zoals aangegeven in figuur 1c. Binnen één periode worden de volgende bewegingen uitgevoerd:

- $t_1 - t_2$ Knijper I is vast en knijper II is los, de duwer-piezo's verlengen zich, waardoor knijper I de schijf rechtsom meeneemt en knijper II linksom gaat.
- $t_2 - t_3$ Knijper I blijft vast en knijper II gaat vast
- $t_3 - t_4$ Knijper I gaat los en knijper II is vast
- $t_4 - t_5$ Knijper I is los en knijper II blijft vast, de duwer-piezo's krimpen, waardoor knijper I linksom terugveert en knijper II de schijf rechtsom meeneemt
- $t_5 - t_6$ Knijper I gaat vast, knijper II blijft vast
- $t_6 - t_7$ Knijper I is vast, knijper II gaat los
- $t_7 - t_8$ Zie $t_1 - t_2$, enzovoorts

Als de spanningen op knijper-piezo's I en II worden verwisseld, gaat de schijf linksom draaien.

Meenelement

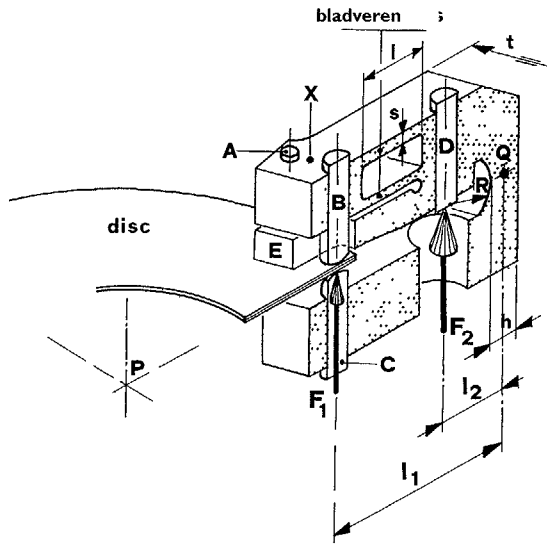
Het meenelement bestaat uit een trapeziumvormig lichaam met aan het uiteinde de knijper, zie figuur 2. Het is vervaardigd uit één stuk roestvast staal AISI-316 met behulp van draadvonken. De verende trapeziumvorm zet de lineaire beweging van de duwer-piezo om in een draaiende beweging van de knijper rond het middelpunt M van de draaitafel [9]. Hiertoe zijn de twee bladveren onder een zodanige hoek, 2α , geplaatst dat de pool P samenvalt met dit middelpunt, zie figuur 3. Voor kleine uitwijkhoeken geldt dat elk punt op



Figuur 3 Verende trapezoïde. De knijper-piezo drukt tegen punt A in de richting van de pijl. De tophoek van de trapezoïde is $2\alpha = 25^\circ$. Afmetingen: $r = 39$ mm, $q = 27,5$ mm, $a = 12$ mm, $b = 10$ mm en $h = 1,5$ mm.

lichaam A, met inbegrip van de knijper, om dit middelpunt draait. Hiermee wordt voorkomen dat de boven- en onderstempels van de knijper ten opzichte van de schijf een draaiende beweging maken, wat aanleiding tot slijtage zou geven. De veerconstante c_1 van de trapezoïde heeft de waarde $c_1 = 1600$ N/mm (zie Appendix A). De duwer-piezo wordt tegen de trapezoïde aan gemonteerd, zodanig dat deze over een afstand van 0,1 mm opzij wordt geduwd. De duwer-piezo verkrijgt daardoor de voorgeschreven voorspanning van 160 N.

De werking van de knijper lichten we toe aan de hand van figuur 4. De helften ter weerszijden van de schijf zijn verbonden door een elastisch gatscharnier met een rotatiestijfheid van $5,3 \times 10^6$ Nmm/rad rondom punt Q. De knijper wordt geopend door bekrachtiging van de piezo die tegen stelbout D aandrukt. Daardoor komt het bovenstempel B vrij van de schijf. Als de elektrische spanning van de knijper-piezo wordt afgehaald, sluit de knijper zich en klemt de schijf vast. In detail beschreven is de werking als volgt. De bovenhelft van de knijper bestaat uit twee evenwijdige bladveren (veerconstante 5500 N/mm) waarin het bovenstempel B is gemonteerd, en een stijve aanslag E. Met de verende afsteuning van het bovenstempel wordt bereikt dat de knijper-piezo in niet-bekrachtigde toestand onder voorspanning blijft. (Als de bovenhelft van de knijper volledig stijf zou zijn geweest, dan zou de knijper-piezo, bij vasiklemmen van de schijf, vrij komen te liggen van D omdat de contactpunten van B en D nooit precies op één lijn kunnen liggen met het draaipunt Q.) Bij het bekrachtigen van de knijper-pie-



Figuur 4 Doorsnede door het middenvlak van de knijper. De krachten F_1 en F_2 en de onderdelen aangegeven met A, B, C, D, E en X worden in appendix B besproken. Afmetingen $R = 7 \text{ mm}$, $l_1 = 28 \text{ mm}$, $l_2 = 10 \text{ mm}$, $l = 10 \text{ mm}$, $s = 1,35 \text{ mm}$, $h = 4,7 \text{ mm}$ en $t = 1,4 \text{ mm}$.

zo, komt de aanslag E omhoog en stuit deze tegen de boutjes A. Het verende deel wordt vanaf dat moment meegenomen, waardoor het bovenstempel vrij komt van de schijf. Het aanslagmoment kan worden ingesteld door in- of uitdraaien van de boutjes A. In principe zou de aanslag E kunnen ontbreken. In dat geval

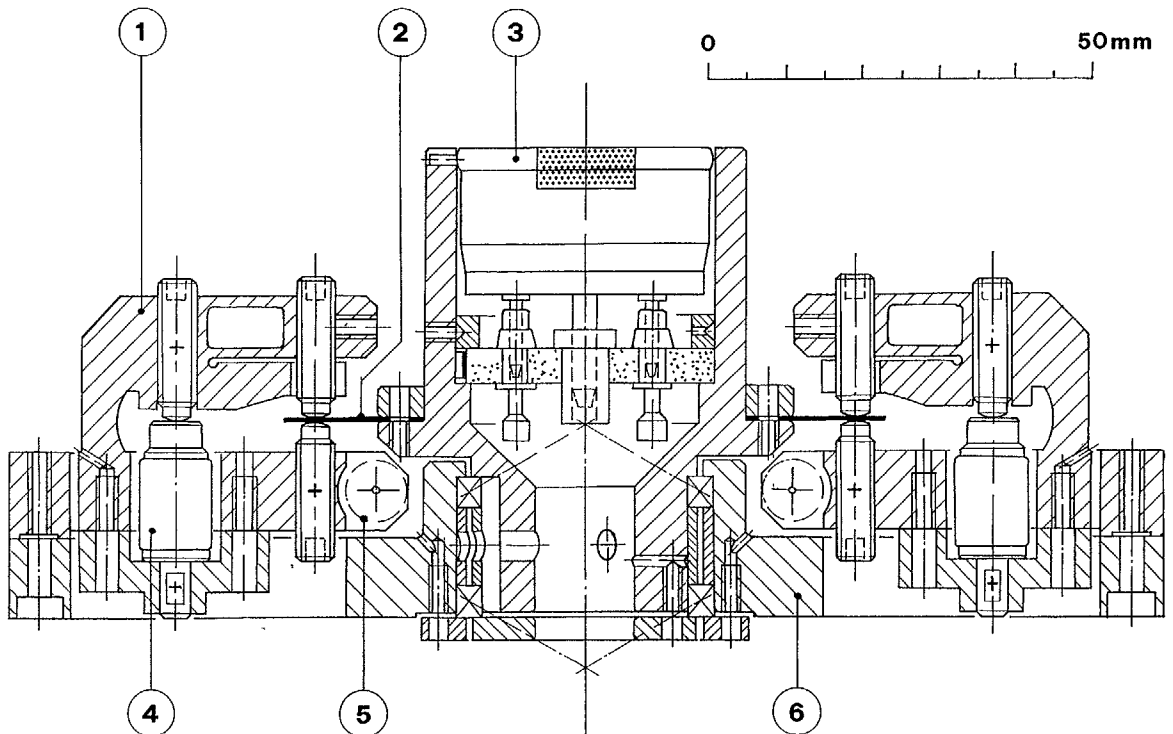
zou de piezo echter over een grotere afstand moeten uitzetten voordat het bovenstempel van de schijf loskomt, wat resulteert in een te grote buigspanning in het gatscharnier bij punt Q. De procedure voor het afstellen van de voorspanning op de knijper-piezo en de knijpkracht op de schijf wordt beschreven in Appendix B.

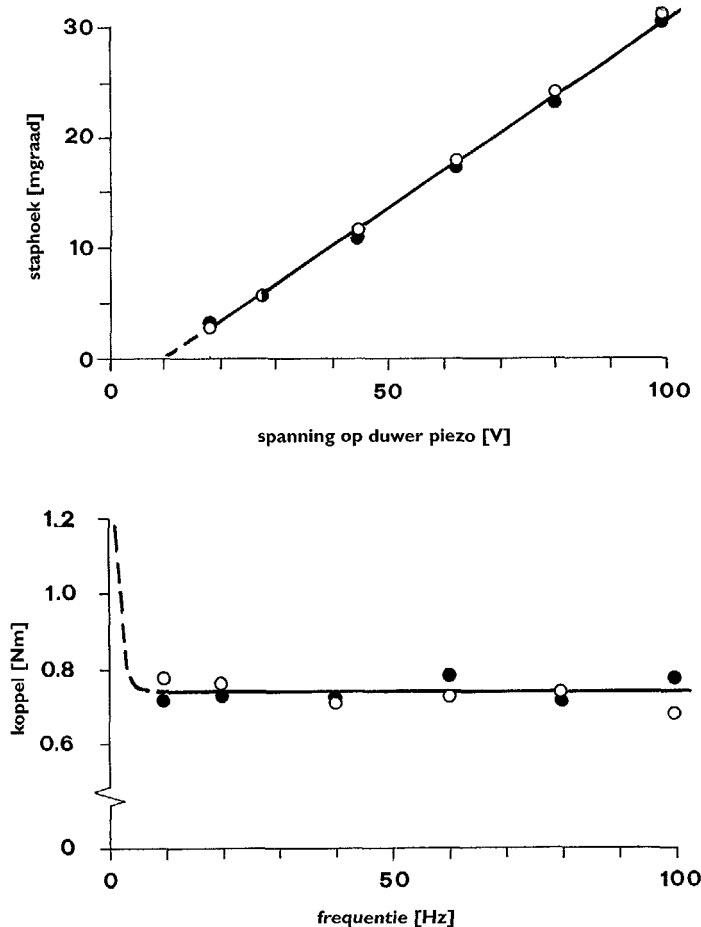
Draaitafel en keuze van materialen

Een doorsnede van de draaitafel, compleet met piezo-elektrische aandrijving, is te zien in figuur 5. De twee meeneelementen met de knijpers (1) zijn tegenover elkaar opgesteld op een grondplaat (6) die met het oog op gewichtsbesparing gemaakt is van aluminium 51ST. De grondplaat vormt tevens de behuizing van voorgespannen 'full-race' hockcontactlagers van roestvaststaal AISI 440C in O-opstelling [10]. Deze lagers zorgen voor spelingsloze draaiing van de rotor met kristalhouder (3). Voor toepassing in ultrahog vacuum zijn de onderdelen van deze lagers, in plaats van smering, voorzien van een wolfram-disulfide ('dicronite') laag. Op de rotor is de schijf vastgeklemd waarop de meenelementen werken. De schijf is 0,25 mm dik en is vervaardigd van 'extra full hard' roestvaststaal AISI-316. Voor de stempels, trapezoiden en knijpers is eveneens AISI-316 gebruikt. Dit materiaal is iets sterker en taaier dan het gebruikelijke roestvaststaal AISI-304.

Figuur 5 Doorsnede van de draaitafel in zijaanzicht, met daarin aangegeven de volgende onderdelen:

- (1) trapezoïde/knijper,
- (2) schijf,
- (3) kristalhouder,
- (4) knijper-piezo,
- (5) duwer-piezo,
- (6) grondplaat.





Figuur 6 Stapgrootte als functie van de duwspanning, met twee duwer-piezo's. De punten o en • zijn gemeten in respectievelijk lucht en vacuüm

en is meer geschikt voor behandeling met het Hardcor® proces [11]. Dit thermochemische oppervlakteproces hebben we toegepast om de slijtvastheid van het materiaal te verbeteren, na behandeling neemt de oppervlaktehardheid toe tot een waarde van circa 1200 HV (0,05) en neemt de vermoedingssterkte toe met zo'n 10 - 100%. Ook wordt voorkomen dat de metalen bij contact in vacuüm gaan 'vreten'. De piezo-elementen voor de knijp- en duwbewegingen, (4) en (5) in figuur 5, zijn commercieel verkrijgbare stapelingen ('stacks'), geschikt voor bedrijf in ultrahog vacuüm [12]. Er werd een piezomateriaal gekozen met een relatief lage Curietemperatuur (220 °C) en een lage bedrijfsspanning ($V_{max} = 100$ V) [13]. De 'stacks' worden bekrachtigd in de ' d_{33} '-mode. Per eenheid van aangelegde spanning verlengt de 'stack' zich met $0,1 \mu\text{m/V}$.

Testresultaten

De draaitafel werd onderworpen aan een aantal testmetingen. Allereerst werd de stapgrootte bepaald als functie van de duwspanning, zowel in lucht als in vacuüm. Zoals uit figuur 6 blijkt, neemt de stapgrootte lineair toe met de aangelegde spanning en is er geen significant verschil tussen bedrijf in lucht en in vacuüm. De minimum stapgrootte blijkt circa 2,6 milligraden en de maximum stapgrootte bedraagt 30 milligraden. Bij een stapfrequentie van 100 Hz komt dit neer op een draaisnelheid van een omwenteling per twee minuten. Bekrachtigen we in plaats van twee duwer-piezo's slechts één duwer-piezo, dan wordt de stapgrootte gehalveerd. Hiermee kan nauwkeuriger worden gepositioneerd, maar de draaisnelheid wordt uiteraard eveneens de helft kleiner bij gelijkblijvende frequentie.

Vervolgens werd het koppel van de piezo-elektrische aandrijving gemeten, en wel door middel van een unster bevestigd aan een punt langs de omtrek van de draaitafel. De spanning op de knijper-piezo was 100 V. Het gemeten koppel heeft een waarde van circa 0,7 Nm, onafhankelijk van de frequentie van de duwknijp cyclus. Het houdmoment in spanningsloze toestand van de knijper-piezo is minstens 3 Nm. Ook in deze metingen was er geen verschil tussen bedrijf in lucht en in vacuüm.

Een vereiste voor toepassing in ultrahog vacuüm is dat de draaitafel bestand is tegen uitstoken. Enkele malen uitstoken tot 135 °C bleek geen gevolgen te hebben voor de werking. Echter, na uitstoken tot ruim 150 °C waren de piezo-elementen gedeeltelijk gedepolariseerd. Hoewel de piezo's eenvoudig opnieuw konden worden gepolariseerd en de draaisnelheid na enige uren bedrijf weer op de oude waarde terug was gekomen, was het dynamisch moment gezakt tot 0,6 Nm. Daarom verdient het voorkomen om een piezo-materiaal te gebruiken met een hogere Curietemperatuur (300 tot 350 °C). Nadeel is dat 'stacks' van dit materiaal dienen te worden bekrachtigd bij een aanmerkelijk hoger voltage ($V_{max} = 1000$ V). Daar staat echter tegenover dat ze een grotere mechanische belasting kunnen hebben. Voor de knijper-piezo en de duwer-piezo zou men commercieel leverbare 'stacks' met verlengingen van respectievelijk $0,01 \mu\text{m/V}$ en $0,006 \mu\text{m/V}$ kunnen nemen [14]. Dit geeft een minimum stapgrootte van een halve milligrad. Redelijke draaisnelheden van een omwenteling per minuut verkrijgt

Piëzo-elektrische draaitafel

men door opvoeren van het frequentiebereik van de voedingspanning tot zo'n 400 Hz.

De draaitafel werd ten slotte onderworpen aan een reeks duurproeven. In een eerste ontwerp van de tafel waren de stempels en de schijf gehard door het aanbrengen van lagen van chroom- en titaanoxide. Echter, reeds na enkele uren bedrijf nam men onder de microscoop diepe slijtagesporen waar. Ook werden de opgebrachte lagen los gehamerd van de oppervlakken. Bevredigende resultaten werden pas verkregen met het bovenvermelde Hardcor® proces [11]. Na deze verbetering doorstond de draaitafel een duurproef van 60 uur bij een frequentie van 100 Hz. Er waren geen zichtbare beschadigingen aan de bewegende onderdelen. De stapgrootte en het dynamisch moment bleven constant. In deze duurproef maakten de trapezoïde en knijper meer dan $2 \cdot 10^7$ buigingen. Dit ging probleemloos, want de maximale waarde van buigwisselspanning in het gatscharnier bij Q ligt onder wisselvastheid van AISI-316

Conclusie

De door ons ontwikkelde draaitafel voldoet, na installatie van piezo-elementen met hoge Curietemperatuur, volledig aan de gestelde specificaties. Bij constante belasting varieert de draaisnelheid minder dan 2%. Uiteraard kan men van piezomaterialen niet verwachten dat hun eigenschappen over een lange periode constant zijn, met name als de temperatuur stijgt tot dicht bij het Curiepunt, zoals bij het uitstoken van de opstelling het geval is. Het tellen van stappen levert dan niet altijd de gewenste nauwkeurigheid. Daarom moet een piezo-elektrisch aangedreven draaitafel altijd worden voorzien van een hoekuitlesing. Wij hebben in ons ontwerp gekozen voor hoekuitlesing door middel van een commercieel verkrijgbare codeschijf, die speciaal is aangepast voor gebruik in ultrahog vacuum [15].

Dankbetuiging

Wij danken I. Attema voor leveren van de benodigde elektrische voedingspanningen en voor zijn hulp bij het opzetten van de testmetingen. W. Maan en L.M. Kan leverden als stagiaires van de Hogeschool Utrecht essentiële bijdragen tot het project. Wij zijn hen dank verschuldigd voor het vele meetwerk aan de diverse prototypes. Het hier beschreven werk maakt deel uit van het onderzoeksprogramma van de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM) en werd

mogelijk gemaakt door financiële steun van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO).

Appendix A

De veerstijfheden van de trapezoïde en de evenwijdige bladveren alsmede de rotatiestijfheid van het gatscharnier Q zijn gemeten en vergeleken met waarden berekend volgens de analytische methode en de eindige-elementenmethode ANSYS. De discrepantie tussen de metingen en de berekeningen is niet eenduidig, zoals uit tabel 1 blijkt.

Voor de analytische methode zijn de volgende formules gebruikt

- Veerconstante c_1 voor trapezoïde [16]:

$$c_1 = \frac{E b h^3 (2r-q)}{Q r \cos \alpha} \frac{r}{(r-a)},$$

waarin de symbolen gedefinieerd zijn in figuur 4

- Veerconstante c_2 voor evenwijdige bladveren [17],

$$c_2 = \frac{2E t s^3}{\ell^3},$$

met de symbolen zoals gedefinieerd in figuur 3

- Rotatiestijfheid K_ϕ van gatscharnier bij Q [18],

$$K_\phi = 0,093 \sqrt{\frac{h}{2R}} E t h^2$$

met E de elasticiteitsmodulus en de andere symbolen zoals aangegeven in figuur 3

- Buigspanning $\sigma_{\phi, \max}$ van gatscharnier bij Q [18],

$$\sigma_{\phi, \max} = 0,54 \sqrt{\frac{h}{2R}} E \cdot \phi_{\max}$$

waarin ϕ_{\max} de maximale hoekverdraaiing van het scharnier.

Overzicht van gemeten en berekende waarden				
		Gemeten	Analytisch	ANSYS
c_1 trapezoïde	[N/mm]	1.6×10^3	0.7×10^3	2.0×10^3
c_2 evenw.				
bladveren	[N/mm]	5.5×10^3	1.4×10^3	8.4×10^3
K_ϕ gatscharnier	[Nm/rad]	5.3×10^6	2.5×10^6	2.5×10^6
s_ϕ gatscharnier	[N/mm ²]	-	170 gem.	240 max.

De verschillen tussen de gemeten en analytisch berekende waarden van de veerconstanten voor trapezoiden en evenwijdige bladveren zijn wellicht te verklaren uit het feit dat de analytische benadering voor lengte/dikte-verhoudingen van respectievelijk 18 en 8 niet meer opgaat. Profstukken van deze veren, waarin een verhouding is gekozen van 120, blijken gemeten waarden op te leveren die binnen enkele procenten overeenstemmen met de analytisch berekende waarden. Tevens merken we op dat de formules voor de gatscharmieren ontwikkeld zijn voor diktes van 1 mm terwijl in ons geval de dikte $h = 4,7$ mm is.

Appendix B

In deze appendix wordt beschreven hoe de voorspanning op de knijper-piezo en de knijpkracht op de schijf worden afgesteld. We noemen de voorspanning op de knijper-piezo F_2 en de knijpkracht op de schijf F_1 . Ze werken op afstanden $l_1 = 28$ mm en $l_2 = 10$ mm van het draaipunt Q, zie figuur 3.

Eerst wordt de elektrische spanning op de knijper-piezo op nul gezet. De piezo is dan teruggetrokken. Het onderstempel C en de stelbout D worden op dusdanige hoogte ingesteld dat zij net aanliggen tegen respectievelijk de schijf en de piezo. Bout D wordt vervolgens ingedraaid over een afstand van 0,015 mm, waardoor de bovenhelft van de knijper een hoekverdraaiing ondergaat van $\phi = 0,015/l_2 = 1,5 \times 10^{-3}$ rad. Bij een rotatiestijfheid van het gatscharmier van $K_\phi = 5,3 \times 10^6$ Nmm/rad levert dit een voorspanning op de piezo ter grootte van $F_2 = K_\phi \phi / l_2 = 800$ N. Dan draaien we de bouten A in, zodat punt X ten opzichte van de aanslag E omhoog komt over een afstand van 0,03 mm. Ten slotte wordt de bovenstempel B ingedraaid over zodanige afstand dat deze tegen de schijf aandrukt en het punt X over een extra 0,01 mm opult. Dus punt X is in totaal over 0,04 mm verplaatst. Bij een bladveerconstante van $c_2 = 5500$ N/mm, resulteert deze verplaatsing in een knijpkracht op de schijf van $F_1 = 0,04 \times c_2 = 220$ N. Tussen de boutjes A en de aanslag E is nu een vrije ruimte van 0,01 mm. De knijpkracht op de schijf resulteert in een lagere voorspanning op piezo dan de eerder genoemde waarde van 800 N aan het begin van de afstelprocedure. Deze kracht wordt $F_2 = 800 - F_1 \cdot l_1/l_2 = 180$ N.

Bij verlenging van de knijper-piezo met 0,01 mm, komt het uiteinde van E omhoog over een afstand van $0,01 \times l_1/l_2 = 0,025$ mm. Bovenstempel B wordt pas opgetild nadat E een slag van 0,01 mm heeft gemaakt, zodat deze dus vrij komt van de schijf over een afstand

van 0,015 mm. In de geactiveerde toestand van de piezo is de bovenhelft van de knijper gedraaid over $2,5 \times 10^{-3}$ rad. De kracht op de piezo is dan maximaal $2,5 \times 10^{-3} \times K_\phi \phi / l_2 = 1320$ N. Deze waarde is nog toelaatbaar.

Auteursnoot

E. de Haas, W. Barsingerhorn en J.F. van der Veen zijn werkzaam bij FOM-Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica, Kruislaan 407, 1098 SJ Amsterdam.

Literatuur

- [1] Zie o.a. Y. Kuk en P.J. Silverman, *Rev. Sci. Instrum.* 60 (1989) p. 165.
- [2] D.W. Pohl, *Rev. Sci. Instrum.* 58 (1987) p. 54.
- [3] Ch. Gerber, G. Binnig, H. Fuchs en H. Rohrer, *Rev. Sci. Instrum.* 57 (1986) p. 221.
- [4] *Catalogue of Inchworms* (© Alt) © The Micropositioning Book, Burleigh Instruments Inc., Burleigh, Fishers, NY, VS.
- [5] Patent aangevraagd.
- [6] De 'kappa' goniometer is voor het eerst ontwikkeld door Nonius. Bijvoorbeeld (Delft).
- [7] Zie o.a. R. Feidenhans'l, *Surface Sci. Rept.* 10 (1989) p. 105.
- [8] M. Lohmeier en E. Vlieg, *J. Appl. Cryst.* 26 (1993) p. 706.
- [9] W.A.M. van Bers, A.J.J. Franken en P.K. Larsen, *Rev. Sci. Instrum.* 54 (1983) p. 637.
- [10] *Precisie-kogellager S1721 MR5 P712 LDD DB4/6 met dicronite laag*, MPB Europa. Bijvoorbeeld, Postbus 27, 1670 AA Medemblik.
- [11] Hardiff BV, Postbus 65, 7360 AB Beekbergen.
- [12] *Physik Instrumente (PI) GmbH & Co.*, Waldbronn, Duitsland, in Nederland vertegenwoordigd door Applied Laser Technology, De Dinkel 2, 5684 PS Best.
- [13] *Fabriekat Physik Instrumente, laag-voltage type P-915 425 (UHV optie)*.
- [14] *Fabriekat Physik Instrumente, knijper-piezo is van het hoog-voltage type P-178 10 (UHV optie), duwer-piezo is van het hoog-voltage type P-249 10 (UHV optie)*.
- [15] Heidenhain Nederland BV, Postbus 107, 3900 AC Veenendaal.
- [16] L.M. Kan en W. Maan, 'Testen en herontwerpen van een piezo-elektrische stappenmotor voor UHV toepassingen', afstudeerverslag Hogeschool Utrecht, Afd. Fijnmechanische Techniek, Hilversum (juni 1994).
- [17] *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*, 15. Auflage, Springer Verlag.
- [18] M.P. Koster, 'Constructieprincipes voor nauwkeurig bewegen en positioneren', syllabus WA-163, Technische Universiteit Twente.