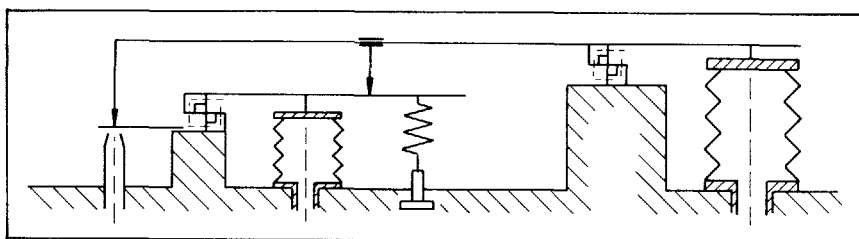


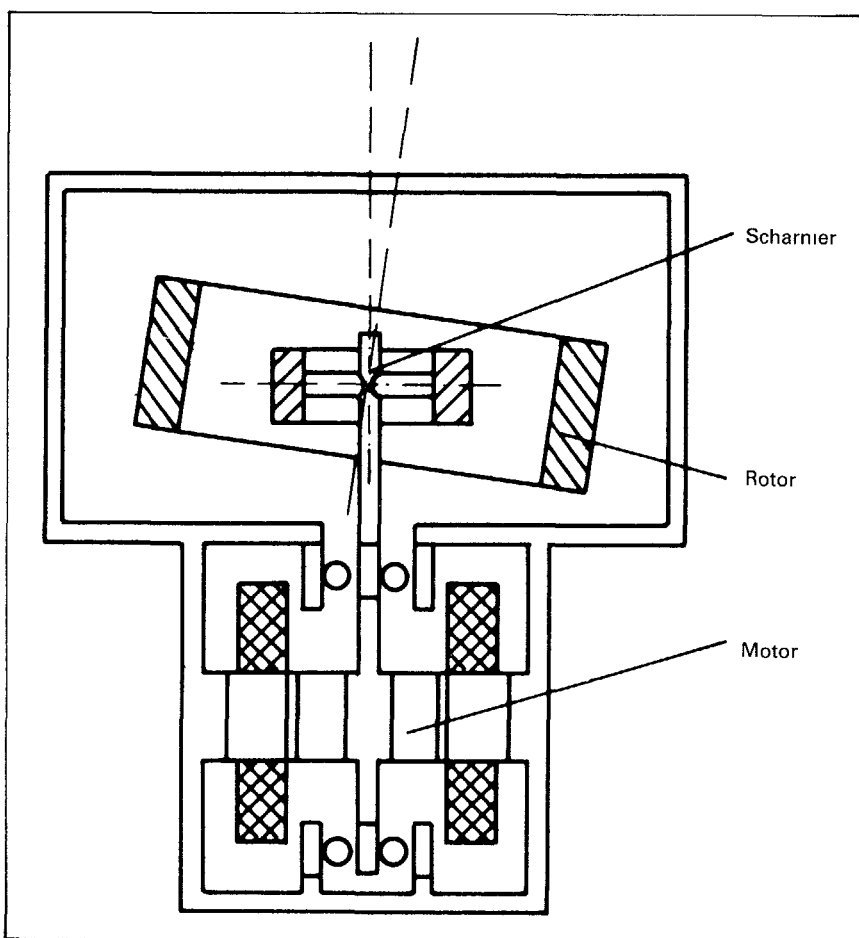
Een nieuw type kruisveerscharnier voor precisie toepassingen

H.G.J. Rutten

De optimalisatie van de reeds bekende kruisveerscharnieren, met het doel een maximale draagkracht bij een gegeven draaistijfheid te bereiken, heeft geleid tot een tot nu toe onbekende scharniervorm met uitzonderlijk goede eigenschappen. De verbetering van belangrijke eigenschappen zoals hysteresis, reproduceerbaarheid en grootte van stoorkoppels zorgt, naast het elimineren van alle justeringen, voor een aanzienlijke kwaliteitsverbetering, die vooral van belang is bij ontwerp en gebruik van sensoren.



Figuur 1 Kruisveerscharnieren in een pneumatische regelaar



Figuur 2 Principe van een dynamisch afgestemde gyroscoop

1. Toepassing en optimalisatie van precisiekruisveerscharnieren

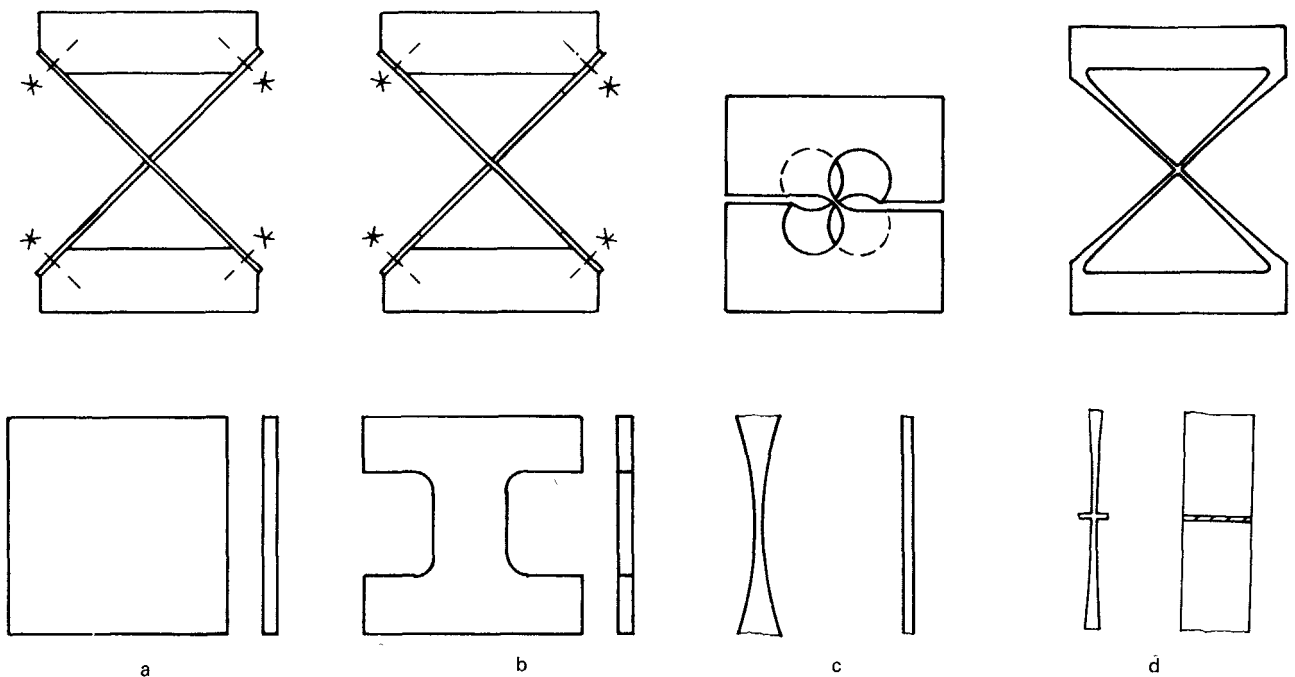
Kruisveerscharnieren worden reeds lang voor precisietoepassingen gebruikt voor het realiseren van precisie-draaibewegingen zonder slijtage over kleine hoeken (enige graden) met een gedefinieerde draaistijfheid (moment per hoekverdraaiing) [1]. Een typische toepassing is de lagering van balansarmen; zie figuur 1. In dit geval zijn hoge draagkracht, geringe draaistijfheid en geringe hysteresis vereist. Dezelfde ontwikkeling, echter met behoudend hogere eisen, geldt voor kruisveerscharnieren voor de ophanging van gyroscooprotoren van de moderne gyros in navigatie-apparatuur [2]. Voor deze toepassing werd het hier geschetste scharnier bij de fa. Anschutz & Co in Kiel (BRD) ontwikkeld en geoptimaliseerd. De gyroscooprotor, vereenvoudigd te beschouwen als een klein vliegwiel wordt door een meedraaiend twee-assig veerkardanscharnier ondersteund. Hierbij staan beide veerscharnierassen loodrecht t.o.v. elkaar en loodrecht op de hartlijn van de as (zie de figuren 2 en 5). De X-as van dit twee-assig scharnier koppelt de motoras met het kardan, de Y-as de rotor met het kardan.

Het kardan werkt in dergelijke veerscharnieren als gevolg van de versnelingen, die bij rotatie optreden in gedraaide toestand, als een negatieve veer [3], zodat de draaistijfheid van het scharnier kan worden gecompenseerd. Dit compenseren noemt men afstemmen. Vandaar dat de naam van dit gyroscoop-type luidt: "dynamisch afgestemde gyroscoop".

Omdat extreme eisen aan de stabiliteit en reproduceerbaarheid van deze gyroscoopen voor de toepassing als richtingen- en toerentalsensor worden gesteld, zijn ook de aan het scharnier te stellen eisen extreem.

Deze hebben tijdens het optimalisatieproces geleid tot een monolitische bouwwijze uitgevoerd met een optimaal veerprofiel [4, 5 en 6].

Tijdens deze optimalisatie, zie figuur 3, bleek dat de tot nu toe bekende bouwvorm met twee gescheiden bladveren niet noodzakelijk was, maar meer werd ingegeven vanwege produktietechnische redenen, zodat een nieuwe bouw-



Figuur 3 Evoluetiestadia bij het optimaliseren van kruisveerscharnieren.

(Bovenste rij: aanzicht in asrichting)

(Onderste rij: de twee aanzichten van het veeropervlak)

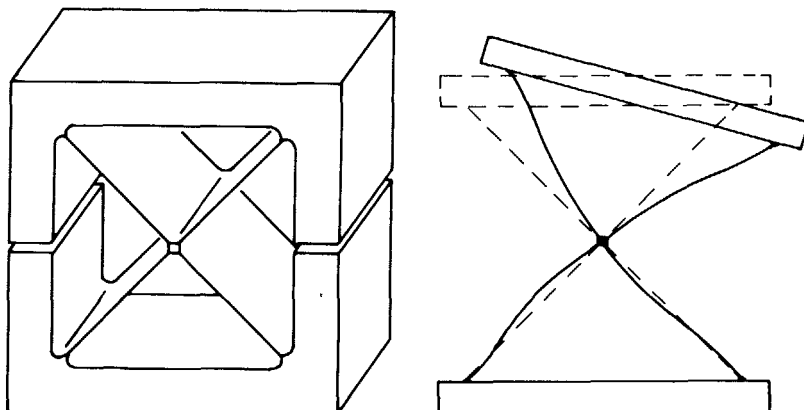
a "Bladveren" met constante dikte en breedte

b "Bladveren" met variabele breedte en constante dikte.

c Halfmonolitisch scharnier (twee delen aan elkaar gelast)

d Monolitisch kruisveerscharnier

Figuur 4 Ongedeeld kruisveerscharnier. Perspectivische voorstelling van een enkelvoudig scharnier. Rechts de vervorming bij het draaien



vorm, het kruisveerscharnier "uit één stuk" ontstond; zie figuur 4. Bij kruisveerscharnieren "uit één stuk" vormen de beide veren één geheel in het scharnierpunt en zijn daar buigstijf met elkaar verbonden, zodat de elastische vervorming van de beide veren elkaar beïnvloedt en zodoende symmetrisch wordt. Hiermee is een van de voornaamste nadelen van het conventionele kruisveerscharnier, de verplaatsing van het scharnierpunt tijdens het draaien, opgeheven. Vooral worden door de belasting opgewekte stoormomenten drastisch kleiner; hetzelfde geldt voor de stijfheden.

De lineaire stijfheden en de draaistijfheden van conventionele kruisveerscharnieren zijn beduidend meer van de belasting afhankelijk dan bij dit nieuwe type. Bovendien is het mogelijk veel compactere te bouwen of anders gezegd,

de beschikbare ruimte van een conventioneel kruisveerscharnier is beter te benutten, door bijvoorbeeld de dubbele veerbreedte toe te passen.

Deze voordelen gaan echter ten koste van een grotere draaistijfheid – omdat de beide veren met elkaar verbonden zijn – alsook van enige beperkingen bij het maken van het scharnier.

2. Berekeningen aan het scharnier

Bij de berekeningen van kruisveerscharnieren worden de conventionele theorieën van de balkdoorbuiging gebruikt. Hierbij wordt rekening ermee gehouden dat brede bladveren in de slappe buigrichting t.g.v. de dwarsstijfheid een schijnbare elasticiteitsmodulus hebben, die gelijk is aan $E^+ = E/(1-\mu^2)$; μ is de dwarscontractiecoëfficiënt. In veel normale constructies, dus ook in het hier bedoelde kruisveerscharnier, vormen twee in dezelfde richting werkende scharnieren een as, zodat dan de waarden voor stijfheid en draaggetal verdubbeld moeten worden. In onderstaande formules wordt slechts één scharnier berekend.

Draaistijfheid.

$$\frac{M}{\varphi} = d_0 = 0,83 E \cdot b \cdot h^3_0 / l_0$$

M/φ bij een korte veer:

$$d = d_0(1 + c_1\alpha + c_2\alpha^2),$$

met

$$l/l_0 = \alpha$$

Toelaatbare draaihoek:

$$\varphi_{\text{toel}} = \frac{M_{\text{toel}}}{d} = \frac{\sigma_{\text{toel}}}{3} b \frac{h_0^2}{d}$$

Stijfheid (translatie, kruishoek 90° , $\alpha=1$)

$$c_L = \frac{4E}{\pi} h_0 b / l_0$$

$$c_\alpha = \frac{4E}{\pi} h_0 b / l_0 \cdot \frac{1}{\frac{E}{2G} \cdot \frac{l_0}{b} + \left(\frac{l_0}{b}\right)^3 \cdot \left(\frac{6}{\pi} - \frac{3}{2}\right)}$$

Draaggetal F in asrichting ($\alpha=1$):

$$\text{afschuiving, } F_s = \frac{1}{3\sqrt{3}} b h_0 \sigma_s$$

$$\text{buiging: } F_B = \frac{4}{3} \frac{b^2 h_0}{l_0} \cdot \sigma_B,$$

$$\text{knik: } F_k = 56 E^* b h_0^3 / l_0^2,$$

Symbolen: b = veerbreedte; h_0 = veerdikte op de dunste plaats direct buiten het veerknooppunt, de veerdikte op de dikste plaats is $2h_0$; l_0 = veerlengte (van einddoorsnede tot einddoorsnede).

3. Optimalisatie

Bij bijna alle toepassingen van kruisveerscharnieren is de draaistijfheid storend. Bij nauwkeurige metingen is deze niet te compenseren omdat zowel de draaistijfheid alsook de verdraaiingshoek onvoldoende bekend zijn. Daarom probeert men bij een gegeven draaggetal een minimum scharnierstijfheid te realiseren. In de bovengenoemde gyroscoop kan de belasting op het scharnier in elke richting voorkomen en volkomen willekeurig zijn. Daarom moet het draaggetal in alle richtingen hetzelfde zijn.

Deze eis kan alleen gerealiseerd worden met betrekking tot afschuiving, buiging en knik. De belastbaarheid op trek is altijd hoger dan noodzakelijk. Omdat bij elke verlaging van het draaggetal door het verkleinen van de veerdoornede of het langer maken van de veren ook de draaistijfheid kleiner wordt, geeft het kleinste toelaatbare draaggetal ook de kleinste mogelijke scharnierstijfheid. Dit betekent dan ook: "Geen draaggetal groter dan noodzakelijk is". De realisatie van dezelfde belastbaarheid in alle richtingen heeft dus dezelfde betekenis als het maakbare minimum aan draaistijfheid. Er mag dus op geen enkele plaats van de veren overbodig (met betrekking tot het draaggetal) materiaal aanwezig zijn dat het scharnier onnodig stijver zou maken.

4. Monolitische bouwwijze

Aan de normaal niet te realiseren eis dat de eigenschappen van een materiaal zo volledig mogelijk worden benut wordt in doorsnee voldaan als geen kerfspanningen, geen spanningsverhogingen door inklemmen en geen eigenspanningen aanwezig zijn. Extreem hoge benutting van de materiaaleigenschappen betekent in dit geval een toelaatbare spanning van 60–90% van de spanning, die de nog net toelaatbare blijvende rek veroorzaakt.

Kerfspanningen kunnen voldoende klein blijven door grote overgangsradii bij doorsnede-varianten toe te passen, hetgeen door de geringe veerdikte zonder problemen is te realiseren. Spanningsverhogingen in inklemmingen zijn doorgaans niet te voorkomen, ook niet als deze nog zo stabiel zijn uitgevoerd. Alleen door de monolitische bouwwijze worden inklemplaatsen vermeden. Eigenspanningen leiden door superpositie met opgewekte spanningen tot het voortijdig vloeien (kruip) van het materiaal. Deze eigenspanningen moeten dan ook door zorgvuldige warmtebehandeling zoveel mogelijk worden opgeheven.

Al deze eisen kunnen en mogen natuurlijk nooit absoluut gesteld worden, maar moeten voor elke toepassing opnieuw in hun kosten-baten relatie beoordeeld worden. In de bovengenoemde gyroscooptoepassing, waar de eisen eenduidig zijn, werd een monolitisch scharnier gerealiseerd dat vrij is van kerfspanningen en slechts minimale eigenspanningen heeft. Een dergelijk twee-assig gyroscoopscharnier bevat vier scharnieren overeenkomstig figuur 4 met de daarvoor vereiste deelsplaten. Figuur 5 toont een gerealiseerd scharnier; let op de afmetingen!

5. Reële uitwerking

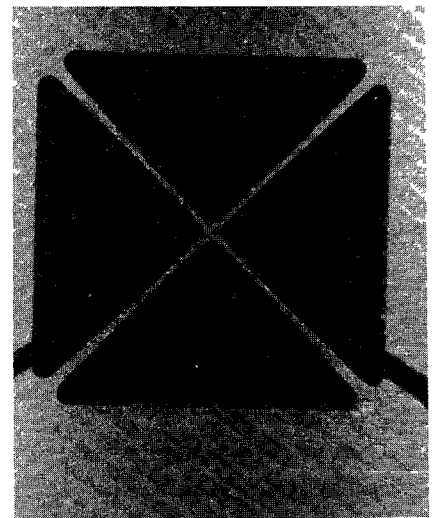
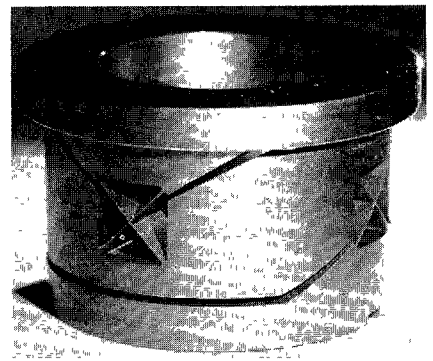
Bij een dimensionering naar een zo laag mogelijke draaistijfheid bij een gegeven draagvermogen wordt er geen rekening mee gehouden dat vaak de eis van een hoge eigenfrequentie grenzen stelt aan de torsiestijfheid, die aan een minimale waarde moet voldoen. Dit betekent kortere veren om vooral de buigvervorming ten gevolge van de torsiebelasting klein te houden.

Een volgende eis betreft de iso-elasticiteit van dergelijke scharnieren. Alleen als de elasticiteit in alle richtingen even groot is (dat betekent iso-elastisch) verschuift het rotorzwaartepunt in de richting van de last, anderszits schuin erop, hetgeen een draaimoment op de rotor veroorzaakt. Dit draaimoment is een erg storende constante, met frequentie nul,

ook als de lastwisselfrequentie willekeurig is. Dit moment is voldoende klein te houden door het gelijkmaken van de elasticiteiten in de drie ruimte-richtingen, b.v. door de kruisingshoek van de veren anders dan 90° te kiezen.

6. Het maken van monolitisch kruisveerscharnieren

Conventionele kruisveerscharnieren worden door klemmen, solderen, lassen, slijpen of eroderen vervaardigd. Voor ongedeelde scharnieren is tot nu toe eroderen de enige mogelijkheid, bij voorkeur draaderoderen. Hiermee kunnen twee scharnieren van één hartlijn tegelijkertijd gemaakt worden, waardoor de positionering t.o.v. elkaar ideaal is. Er is echter een flinke dosis zorgvuldigheid nodig om de machine-nauwkeurigheid te handhaven. Als bronnen van mogelijke fouten zijn te noemen: draaddiameter, geleidbaarheid van het erodeermedium, draadgeleiding, trillingen van de draad of van gedeelten van het scharnier die reeds



Figuur 5 Monolitisch tweeassig veerscharnier voor een gyroscoop (ca 12 mm hoog). Onder een detail van de veerconstructie (ca 4 x 4 mm).

bewerkt zijn. Al deze parameters moeten geoptimaliseerd worden om een kwalitatief zo hoogwaardig mogelijk produkt te verkrijgen. Omdat alle sneden die in de richting van de gemeenschappelijke hartlijn liggen in één opspanning uitgevoerd worden, zijn de uitrichtfouten van de veervlakken t.o.v. deze hartlijn verwaarloosbaar klein.

7. Materiaalkeuze en toelaatbare spanningen

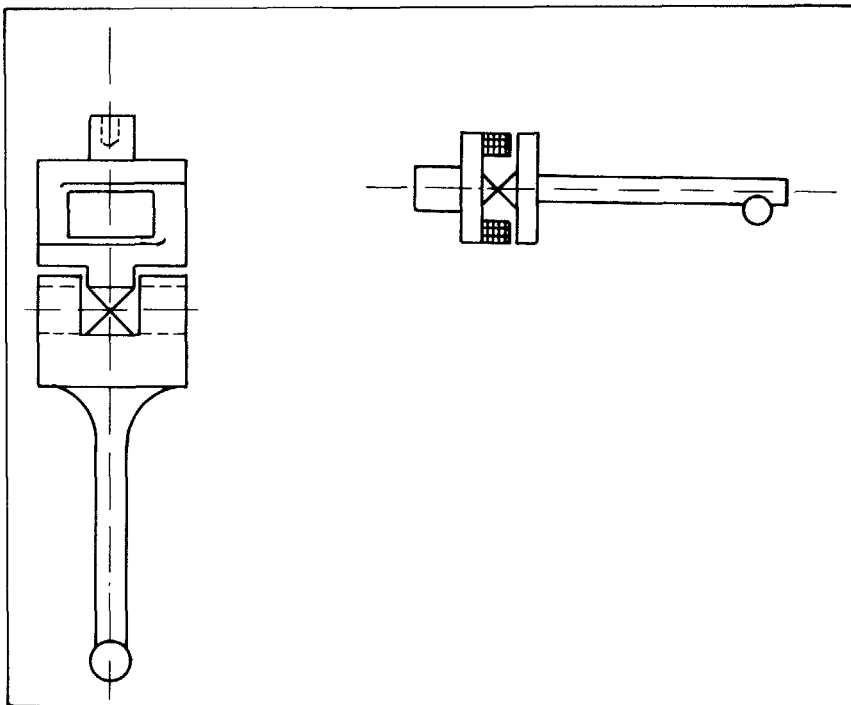
In principe is elk gewenst veermateriaal geschikt. Er moet echter op gelet worden dat het materiaal door warmtebehandelingen vóór het eroderen van de veren in de uiteindelijke toestand wordt gebracht. Bij de sterkteberekeningen is vooral voor de toepassing als gyroscoopscharnier te letten op de toelaatbare wisselsterkte, omdat tijdens bedrijf 200 tot 800 draaibewegingen van een veerscharnier per seconde als normaal kunnen worden beschouwd. Dit komt dan per jaar neer op ca. $2,4 \cdot 10^{10}$ belastingswisselingen. Voor dergelijke hoge aantallen belastingswisselingen is de duurbelastingsterkte normaliter niet bekend. Een oplossing is mogelijk door materialen te kiezen die een constante duurbelastingsterkte hebben boven een bepaald aantal belastingswisselingen. Natuurlijk is het ook mogelijk materialen te gebruiken waarvan de eigenschappen met een goede benadering een bekend gedrag vertonen en diensgevolge bij een hoger aantal belastingswisselingen extra-poleerbaar zijn.

8. Voordelen van het geoptimaliseerde ongedeelde kruisveerscharnier

Toepassingsmogelijkheden

De monolitische, ongedeelde uitvoering van kruisveerscharnieren heeft de volgende voordelen t.o.v. de orthodoxe, gedeelde

- De hysteresis in de moment-hoek karakteristiek is vrijwel geheel afwezig
- Na het wegnemen van de belasting is de overblijvende draaihoek beslist kleiner dan 10^{-6} van de maximale draaihoek, de hysteresis is, als deze nog te meten is, alleen nog maar meetbaar in de gyroscoop zelf.
- De positie van zijn draaiingsas blijft bij draaien van het scharnier gelijk. Bij radiaal belasten van het gedraaide scharnier ontstaan dan ook aanzienlijk kleinere stoormomenten dan bij conventionele kruisveerscharnieren. Deze stoormomenten tenderen er toe de draaiing te vergroten.



Figuur 6 Ongedeeld kruisveerscharnier in een drie-assig elastisch scharnierende tastvinger (links), resp. een oppervlakte-tastvinger (rechts).

- De in de asrichting beschikbare constructieruimte kan bij wijze van spreken twee keer gebruikt worden.
- Bij dezelfde veerafmetingen is de belastbaarheid op buiging, afschuiving en trek onveranderd terwijl de toelaatbare knikkraft verdubbelt in verband met de fixering van de veren in de as(hart)lijn.
- De draaistijfheid wordt circa driemaal groter en daaraan gekoppeld daalt de toelaatbare draaihoek tot éénderde. Deze relatie geldt alleen voor het scharnier met cirkelvormige en in de dikte verjongde veren, die aan het einde de dubbele minimale dikte hebben bereikt. Deze relatie verandert weer als het monolitische scharnier op gelijke belastbaarheid wordt geoptimaliseerd.

Deze scharnierconstructie is, als uitsluitend naar het scharnier wordt gekeken, ten gevolge van de kostbaardere bewerkingen zonder twijfel duurder dan de conventionele kruisveerscharnieren. Wordt echter rekening gehouden met de noodzakelijke montagevlakken en aansluitdelen én de montagekosten in de kostprijsberekening van conventionele kruisveerscharnieren, dan kan de balans geheel ten gunste van het monolithisch kruisveerscharnier uitslaan. Wordt bovendien rekening gehouden met de bereikbare kwaliteit, dan is het scharnier overal daar inzetbaar waar conventionele oplossingen niet het gewenste resultaat opleveren.

Overal waar in eerste instantie relatief goedkope, conventionele kruisveerscharnieren ten gevolge van het justeren ontregeld worden, is eveneens een toepassingsgebied denkbaar. Behalve deze dynamisch afgestemde gyroscoopen zijn als reeds uitgevoerde of mogelijke toepassingen nog te noemen: waterpas/schietloodsensoren, versnellingsmeters, tastvingers van 3D-meetmachines, oppervlakteruwheids- en profielmeetsensoren, zie figuur 6, als ook lageringen van weegschalen en balansen.

Literatuur

- [1] Geary, P.J.: Flexural Devices, Bibliograph Survey BSIRA Research Report, 1954
- [2] Haberland, R en H Karnick: Tuned gyro cost reduction through a novel hinge design AGARD AG 254, 1981
- [3] Craig, R.: Theory of operation of an elastically supported tuned gyroscope IEEE Trans, Vol AES 8 (1972), 3.
- [4] USP 37 00 289.
- [5] DBP 26 26 800
- [6] DBP 26 53 427.

Oorspronkelijke titel: Neuartige Kreuzfeder-gelenke für Präzisionsanwendungen, Auteur: Prof Dr Ir R Haberland, Kaiserlauteren Verschenen in Feinwerktechnik & Messtechnik 1984, jrg, 92, nr. 8, uitgave van Carl Hanser Verlag, München