

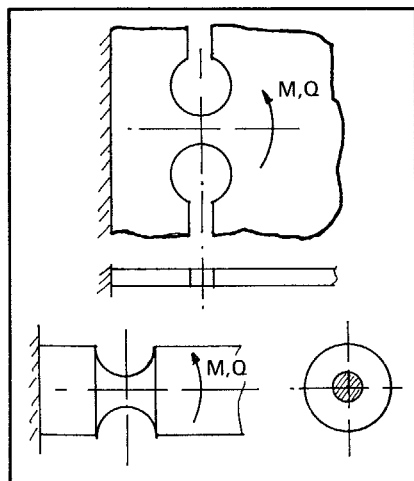
# Elastische scharnieren in fijnmechanische constructies

Ir. J. v. Amelsvoort    Ingenieursburo voor ontwerp van kleine werktuigen te Anjum.

Het gebruik van elastische scharnieren in de werktuigbouw is niet bepaald van recente datum. Maar het toepassingsgebied ervan is altijd wel zeer beperkt gebleven. Namelijk totdat van de spanmiddelen: klembussen, spantangen e.d. Het gebruik ervan kan echter in veel meer situaties leiden tot constructies die relatief goedkoop zijn en die, qua positioneringsnauwkeurigheid, mechanische en thermische stabiliteit verrassende resultaten geven. In dit artikel beperken we ons tot de elastische gat-scharnieren.

## Inleiding

Een elastisch scharnier (uitgevoerd in plaat of staf) kan worden gedefinieerd als een zodanige plaatselijke verzwakking van het materiaal, dat ter plaatse een t.o.v. het omringende materiaal een veel lagere weerstand tegen hoekverdraaiing ontstaat (zie figuur 1). Het doel van een gatscharnier is in het algemeen



Figuur 1 Gatscharnier uitgevoerd in plaat en staf

het scheppen van een extra vrijheidsgraad resp. het opheffen van een overbepaaldheid.

De grote voordelen van dergelijke scharnieren zijn:

eenvoudig (en dus goedkoop) aan te brengen, spelingsvrij en vrij van reele wrijving.

De beperktheid van het elastisch werkgebied van dergelijke scharnieren maakt echter, dat het toepassingsgebied ervan begrensd is. Een voor de hand liggend en ook lukratief toepassingsgebied is dat van de stelmechanismen. In het bijzonder wil ik hier vernoemen het gebruik er-

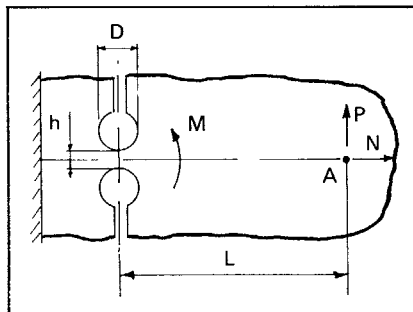
van in hoogvacuüm en lage temperatuur systemen.

Daarnaast kan de toepassing ervan een zeer belangrijke rol spelen bij het voorkomen van plaats-overbepaaldheid in allerlei constructies. Beide toepassingsgebieden zullen worden belicht aan de hand van een aantal voorbeelden, ontleend aan het 'Des Duivels Prentenboek' (D.D.P.) van prof ir. W. van der Hoek (vakgroep WP, afd. werktuigbouw THE).

## Stijfheid, sterkte en elastisch werkgebied

Om elastische scharnieren in stelmechanismen toe te kunnen passen, is het natuurlijk nodig informatie te bezitten omtrent de stijfheid, de sterkte en het elastisch werkgebied van dergelijke scharnieren.

Gegeven een gatscharnier, figuur 2 en een punt A op afstand  $l$  van het scharnier, dat we in dwarsrichting willen kun-

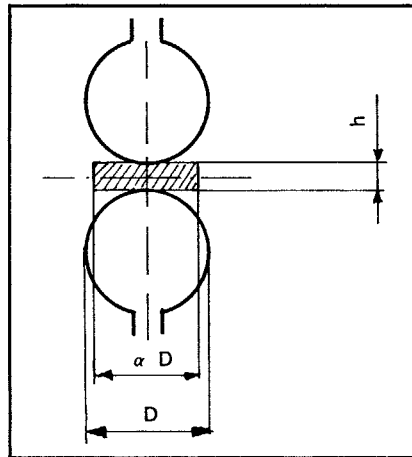


Figuur 2 Gatscharnier met een gatdiameter  $D$ , damdikte  $h$ , plaatdikte  $t$

nen bewegen met een relatief lage dwarsstijfheid  $C_d$ , terwijl we de langsstijfheid  $C_l$  relatief groot willen houden. Het ontwerpen van een gatscharnier, dat een bepaalde hoekverdraaiing moet kunnen ondergaan onder een bepaalde be-

lasting, houdt in het leren kennen van de in dat geval benodigde verhouding  $D/h$ . Dat is het quotient van de gatdiameter en de overblijvende damdikte. Een indicatie van deze verhouding  $D/h$  kan worden verkregen met een benaderende berekening.

In het voor gatscharnieren relevante gebied kan het aan vervorming onderhevige deel worden voorgesteld door een rechthoekig balkje met een hoogte  $h$  en een lengte  $\alpha\sqrt{Dh}$ . (Zie figuur 3)



Figuur 3 Schematisering van een gatscharnier

Belast op trek is het dammetje dan even stijf als een rechthoekig balkje met hoogte  $h$  en lengte  $l_t = 2\sqrt{Dh}$ .

D.w.z. dat de lengte  $l_t$  dan overeenkomt met de afstand waarover het echte gatscharnier een damhoogte  $<3h$  heeft. (Voor de goede orde zij vermeld, dat we de langsstijfheid  $C_l$  definiëren als het quotient van de trekbelasting en de toename van de spleetbreedte.)

Belast op buiging is het dammetje even stijf als een rechthoekig balkje met hoogte  $h$  en lengte  $l_b = 0,9\sqrt{Dh}$ . Nu telt de damhoogte tot de derde macht en komt de lengte  $l_b$  van het gelijkwaardige rechthoekige balkje overeen met de afstand waarover het echte gatscharnier een damhoogte  $<1,4h$  heeft.

De langsstijfheid  $C_l$  kan nu geschreven worden als:

$$C_l = \frac{E \cdot t \cdot h}{2\sqrt{D} \cdot h} = 0,5 \sqrt{\frac{h}{D}} \cdot E \cdot t$$

De dwarsstijfheid  $C_d$  als:

$$C_d = \frac{E \cdot t \cdot h^3}{12 \cdot L^2 \cdot 0,9 \sqrt{D \cdot h}} =$$

$$0,093 \cdot \sqrt{\frac{h}{D}} \cdot E \cdot t \cdot \left(\frac{h}{L}\right)^2$$

waarin: E de elasticiteitsmodulus  
t de plaatdikte  
h de damhoogte  
D de gatdiameter  
L de afstand van punt A tot het scharnier

Bij het ontwerpen van een gatscharnier kan het eerste criterium zijn de gewenste minimale verhouding  $C_t/C_d$ , waarvoor bij benadering geldt:

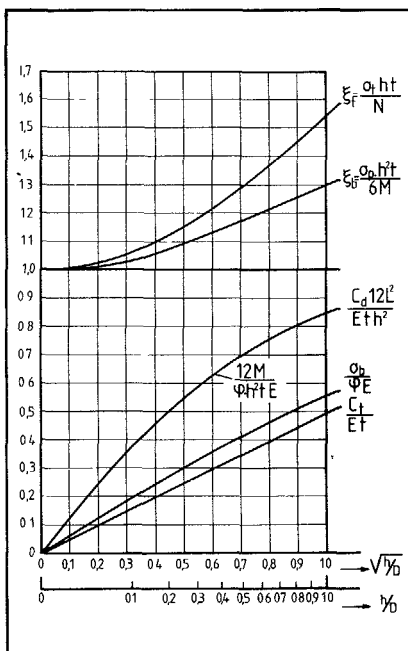
$$\frac{C_t}{C_d} = 5 \left(\frac{L}{h}\right)^2$$

Bij een gegeven afstand L volgt hieruit de eerste keus van de damhoogte h, nl.:

$$h \leq L \sqrt{\frac{5C_{dmax}}{C_{tmin}}}$$

De kleinste dwarsdoorsnede h.t van de dam zal naast de buigspanning en gegeven de spanningsconcentratie aan de gatwand, die in rekening gebracht kan worden door kerffactoren voor trek en buiging, een eventueel optredende trekkracht N moeten kunnen opnemen.

Figuur 4 Gatscharnier-karakteristieken



Vaak ligt de plaatdikte t om andere redenen al vast en soms zal dan blijken, dat h groter gekozen moet worden en de gewenste verhouding dus niet haalbaar is, ofwel dat een gatscharnier niet de geschikte oplossing biedt.

Lijkt de in eerste instantie gevonden damdikte h echter acceptabel, dan volgt de gatdiameter D uit de hoekverdraaiingseis.

Met  $M = \sigma_b \cdot W$

waarin:  $\sigma_b$  = de buigspanning  
W = het weerstandsmoment t.p.v. de kleinste doorsnede

$$W = \frac{1}{6} h^2 t \text{ en}$$

$$M = C_\varphi \varphi$$

waarin:  $\varphi$  = de hoekverdraaiing  
 $C_\varphi$  = de stijfheid tegen hoekverdraaiing:

$$C_\varphi = 0,093 \sqrt{\frac{h}{D}} \cdot E \cdot t \cdot h^2$$

wordt:

$$\varphi_{max} = 1,8 \frac{\sigma_b}{E} \sqrt{\frac{D}{h}}$$

waarin:  $\sigma_b$  de maximaal toelaatbare buigspanning.

En daarmee is een indicatie gegeven van de verhouding D/h:

$$\frac{D}{h} \geq \left(\frac{E}{\sigma_b}\right)^2 \cdot \frac{\varphi_{max}^2}{3}$$

Omdat het van belang is het ontwerp op eenvoudige wijze te verifiëren en te optimaliseren zijn door dr.ir. L. Braak (vakgroep WTM, THE) en A. van Buel (groep WP, THE) met de elementen-methode berekeningen uitgevoerd aan gatscharnieren. Dit heeft geleid tot een grafiek, weergegeven in figuur 4.

Deze geeft als functie van h/D resp.  $\sqrt{h/D}$  de volgende dimensieloze grootheden.

- de genormeerde trekstijfheid  $\frac{C_t}{E \cdot t}$

- de genormeerde dwarsstijfheid

$$\frac{C_d}{E \cdot t} = \frac{12L^2}{h^2}$$

- de draaiingshoek (reciprook terwille van de afleesbaarheid bij kleine h/D), genormeerd als:

$$\frac{\sigma_b}{\varphi E} \text{ en als: } \frac{12M}{\varphi \cdot h^2 \cdot t \cdot E}$$

(gelijk aan de grafiek van de genormeerde dwarsstijfheid)

- de kerffactor voor buiging:

$$\xi_b = \frac{\sigma_b \cdot h^2 \cdot t}{6M}$$

- de kerffactor voor trek:

$$\xi_t = \frac{\sigma_t \cdot h \cdot t}{N}$$

(en daarmee tevens de ware spanningen waarbij  $\sigma_{tot} = \sigma_b + \sigma_t$ ).

Om deze relaties ook geldigheid te verlenen voor in staf uitgevoerde elastische scharnieren vullen we voor de plaatdikte in:

$$t = \frac{\pi}{4} \cdot h.$$

Zijn de gaten ongelijk van de diameter (b.v.  $D_1$  en  $D_2$ ) dan kan men zich toch oriënteren met genoemde grafiek via de benadering:

$$\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} = \frac{2}{D}$$

Voor een gat  $D_1$  op een afstand h van een rechte plaatrand ( $D_2 = \infty$ ) komt dat neer op  $D = 2D_1$ .

Voor instellen, nastellen en uitrichten mag men eventueel tot in het plastische gebied gaan, waardoor het bereik sterk wordt vergroot.

Zou men zo'n constructie laten functioneren in de meest gedeformeerde toestand, waarbij het materiaal op kritische plaatsen op vloeien staat, dan zou al bij de geringste uitwendige belasting vloeit optreden. In zo'n geval kan men het best eerst de elastische terugvering meten (door verstelling tot in het vloeigebied en te laten terugveren) en vervolgens de constructie instellen in het plastische gebied tot ca. het gemeten bedrag voorbij de gewenste positie. Regelt men dan terug op de gewenste waarde dan zijn in die stand in het algemeen de spanningen het laagst en is de externe belastbaarheid het grootst.

## Stelmechanismen

Stangenmechanismen, hoe mooi ook in het voorbeeld, tonen hun (stijfheids-) gebreken als een zijaanzicht ervan wordt bekeken. Tellen wij daarbij op de onvermijdelijke spelingen in de draaipunten,

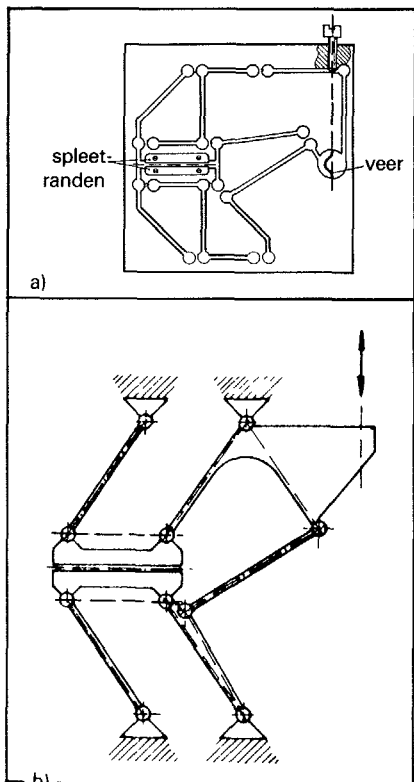
dan blijkt maar al te vaak, dat zelfs dure fabrikage technische hoogstandjes niet kunnen voorkomen, dat de fraaie kinematische keten toch een werktuigkundig monster baart.

Dezelfde kinematische keten, gekoncipeerd in plaat met elastische scharnieren, toont daarentegen een fraai zijaanzicht, terwijl de draaipunten spelingsvrij zijn.

In het hiervolgende worden enkele voorbeelden van praktisch uitgevoerde constructies weergegeven.

**Variabele spleet**

Voor een optisch instrument ontwierp H.M. Ruyten (THE, groep WP) een spleetconstructie, die symmetrisch om zijn hartlijn in breedte instelbaar is van 0 tot 1 mm. Binnen het instelgebied blijft de afstand van de spleetranden tot de hartlijn overal binnen 1 µm dezelfde. Het geheel is uitgevoerd in plaat met gaten en sleuven, met twee scheermesjes die dienst doen als spleetranden. Ter verduidelijking is ook het vervangend stangenmechanisme geschetst (figuren 5a en 5b).



Figuur 5 Instelbare spleet-constructie  
a. uitgevoerd in plaat met elastische scharnieren  
b. het vervangend stangen-mechanisme

**Knie-hefboom mechanisme**

Voor een optisch apparaat, waarin zeer nauwkeurige spiegelinstelhoeken ge-

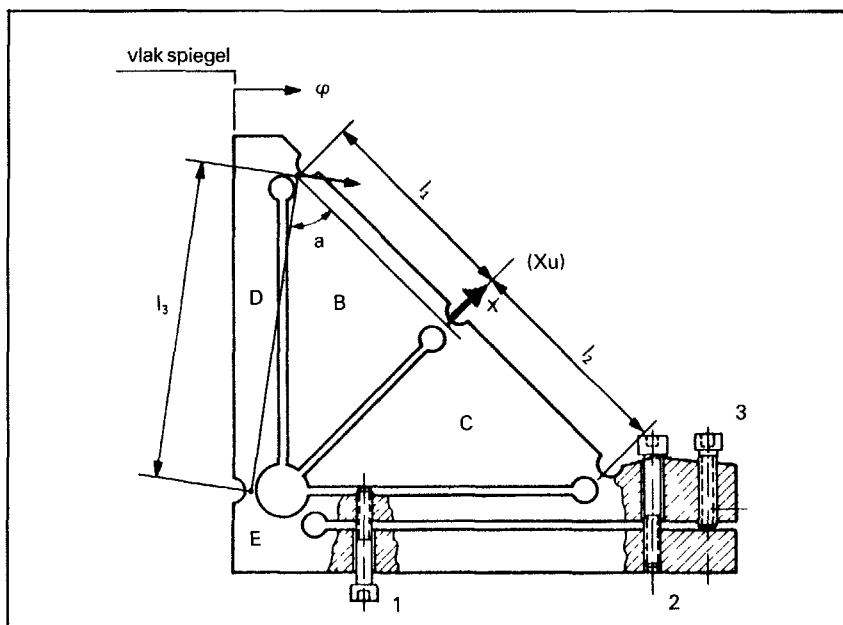
vraagd werden, maakte Hr. Reinders (Lab v. lengtemeting, THE) gebruik van het constructie-principe volgens figuur 6, met grof- en fijninstelling (schroef 2 resp. schroef 1). Het nadeel is dat de fijninstelling niet linear is. Een vaste verdraaiing van schroef 1 geeft geen vaste hoekverdraaiing φ. Het voordeel is dat men de overbrenging vrijwel willekeurig kan kiezen.

Definieert men in de gestrekte stand van de kniehefboom (= de uiterste stand van φ in de fijninstelling): φ = 0 en x = 0 dan geldt:

in. Hierna stelt men met schroef 2 de hoek φ zo goed mogelijk op de gewenste waarde in, om dan fijn te regelen met schroef 1 in de gewenste 'overbrengverhouding' d w.z. nauwkeurighedsgraad.

**Een gekombineerd afstands-hoekinstellings-mechanisme**

Voor een optisch instrument, waarbij een sferische spiegel tot binnen enige micrometers in het brandpunt van een parabolische spiegel moet worden ge-



Figuur 6 Kniehefboom mechanisme voor nauwkeurige hoekinstelling  
schroef 1: fijn-instelling  
schroef 2: grof-instelling  
schroef 3: blokkering

$$\varphi = \left( \frac{x^2}{2l_1} + \frac{x^2}{2l_2} \right) \cdot \frac{1}{l_3 \sin \alpha}$$

met  $\alpha = 45^\circ$  en  $l_1 = l_2 = l$  en  $l_3 = l\sqrt{2}$  wordt dit

$$\varphi = \left( \frac{x}{l} \right)^2 \text{ en } y = \varphi l_3 = \frac{x^2}{l} \sqrt{2}.$$

Voor kleine verdraaiingen dφ geldt de 'overbrengverhouding'

$$i = \frac{dy}{dx} = \frac{2x\sqrt{2}}{l}$$

Men kiest dus de gewenste overbrengverhouding i en vindt zo de uitgangswaarde x<sub>u</sub>.

$$x_u = \frac{l \cdot i}{2\sqrt{2}}$$

De procedure is dan als volgt: met schroef 1 brengt men φ en x in de nulstand (te vinden als de symmetriestand tussen een + x en - x waarbij φ dezelfde waarde heeft). Van daaruit stelt men x<sub>u</sub>

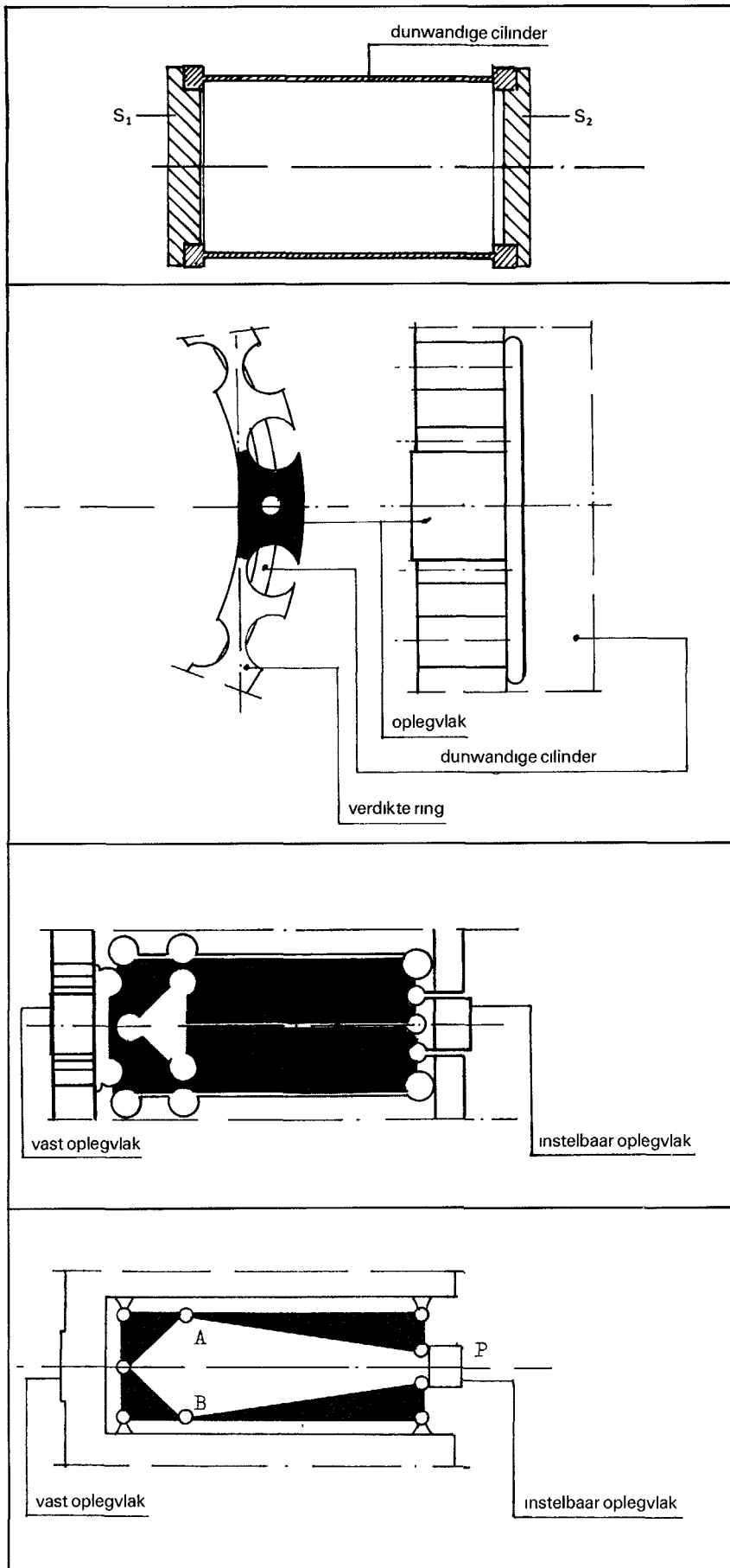
bracht, deze positie behouden moet blijven over een temperatuurtraject van 300° (tot dichtbij het absolute nulpunt), en de mechanismen een zo gering mogelijke massa en massatraagheid moeten bezitten, maakte de schrijver dezes gebruik van de constructieprincipes volgens figuur 7a t/m d.

De beide spiegels S<sub>1</sub> en S<sub>2</sub> worden geplaatst op drie oplegvlakjes aan de verdikte uiteinden van een dunwandige cilinder (figuur 7a).

Deze oplegvlakjes hebben d.m.v. elastische scharnieren bewegingsvrijheid in radiale richting verkregen (zie figuur 7b), zodat eventueel optredende radiale uitzettingsverschillen tussen cilinder en spiegel geen beeldvervormende spanningen op de spiegel loslaten.

De drie oplegvlakjes van één der spiegels kunnen met in de cilinderwand aangebrachte elastische hefboommechanismen afzonderlijk worden verplaatst in axiale richting. Figuur 7c laat een uitslag zien van een deel van de cilinderwand, dat zo'n mechanisme bevat.

Ter verduidelijking is in fig. 7d het ver-



vangend stangen-mechanisme geschetst. Manipulatie van de afstand tussen A en B geeft een verplaatsing van het oplegpunt P. De verkregen instelling kan daarna t.o.v. het informatie-vasthoudend deel van de cilinder worden gefixeerd.

### Een kubus met drie hoekinstellingen

Voor een film-tructafel ontwikkelde D.M. van Dijk (groep WP, THE) een kameradrager waarvan de drie hoeken van de opspanvlak  $\xi$ ,  $\psi$  en  $\varphi$ , d.w.z. de rotaties om resp. x, y en z-as binnen een klein bereik onafhankelijk van elkaar instelbaar zijn. De kameradrager bestaat uit een uit zes platen opgebouwde kubus, waarvan het achtervlak aan de kamerawagen is bevestigd en het voorvlak dienst doet als opspanvlak voor de kamera. De zijvlakken van de kubus zijn zodanig aangeboord en uitgezaagd, dat het voorvlak d.m.v. een éénduidige kinematische keten met 0 graden van vrijheid aan het achtervlak is bevestigd.

Figuur 8a laat een schematische voorstelling van deze keten zien. Het voorvlak ABCD is (hier symbolisch d.m.v. bolscharnieren) aan het achtervlak bevestigd en wel:

- via de vast aan vlak ABCD bevestigde pyramide PABD,
- via de om de lijn CD scharnierende driehoek CDR,
- via de in C met een bolscharnier bevestigde stang CQ.

Variatie van de lengte CQ geeft de rotatie  $\xi$  om PR (x-richting), variatie van de lengte CR geeft de rotatie  $\psi$  om AP (y-richting), variatie van de lengte AP geeft de rotatie  $\varphi$  om QR (z-richting)

Figuur 8b geeft een uitslag van de uiteindelijke uitvoering. De gearceerde vlakken geven de functie van het meetkundig model in de werkelijke kameradrager aan. Het stelschroevenpaar (trek en druk):

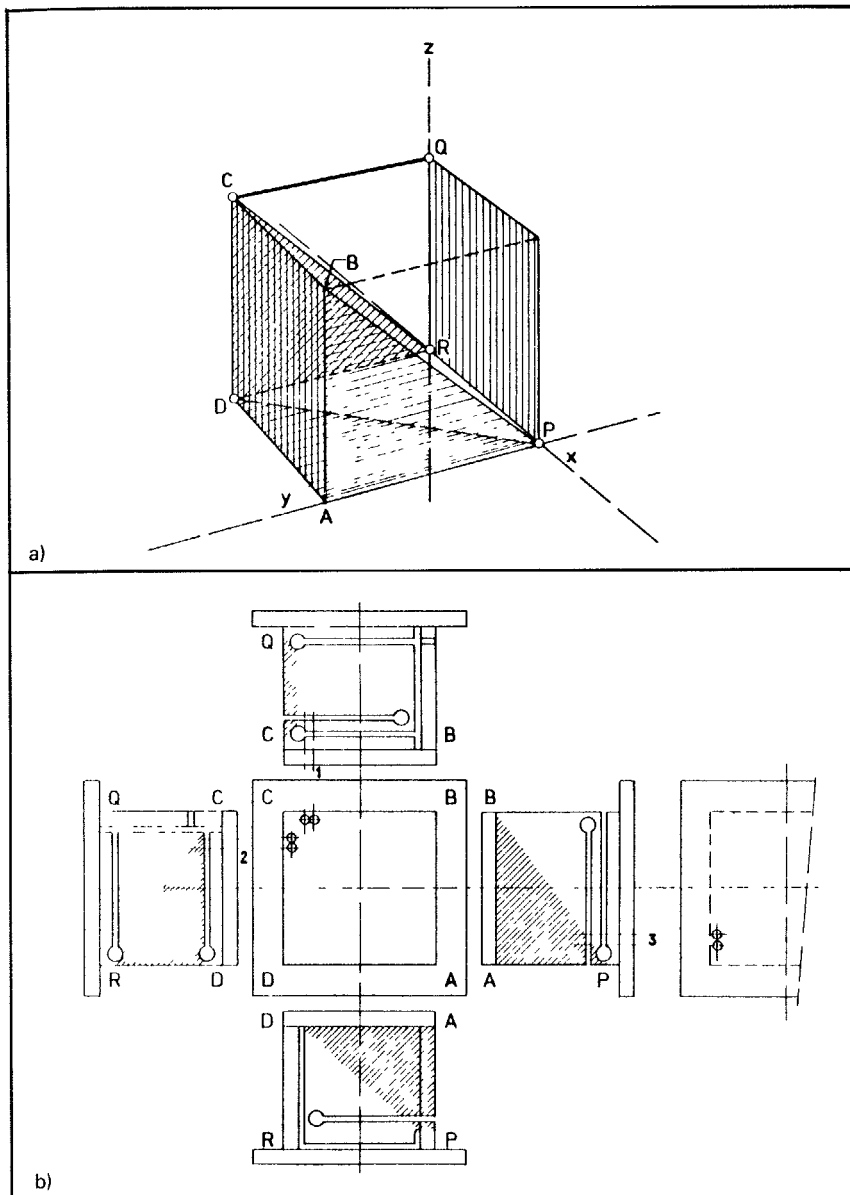
- (1) verstelt de lengte CQ (rotatie  $\xi$ )
- (2) verstelt de lengte CR (rotatie  $\psi$ )

Figuur 7a De positie van de beide spiegels

Figuur 7b Een in radiale richting vrijgemaakt oplegvlak (detail van een uiteinde van de dunwandige cilinder)

Figuur 7c Elastisch hefboom mechanisme, uitgevoerd in een cilinderwand (uitslag van een deel van de cilinderwand)

Figuur 7d Het vervangend stangenmechanisme (manipulatie van de afstand AB geeft een verplaatsing van P)



Figuur 8 Een kubus met drie hoekinstellingen

a. De kinematische keten met 0 graden van vrijheid

b. De uitvoering in plaat met elastische scharnieren

(3) verstelt de lengte AP (rotatie  $\varphi$ ). Opgemerkt dient nog wel te worden dat de rotaties  $\xi$  en  $\varphi$  elkaar kruisen met een afstand PR, hetgeen voor deze toepassing geen bezwaar is.

### Het voorkomen van plaats-overbepaaldheid

Men kan stellen dat veel, zo niet de meeste mechanische bewerkingen (in het bijzonder de nauwkeurige), zoals die in de praktijk van machinefabrieken en werkplaatsen voorkomen, slechts dienen om te voorkomen, dat plaats-overbepaaldheid in het ontwerp manifest

wordt (een stelling van prof.ir W. van der Hoek).

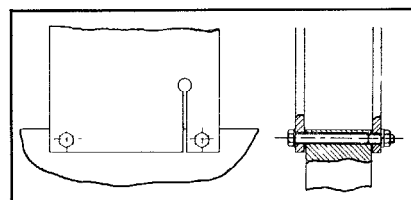
Elastische scharnieren kunnen in constructies van velerlei aard, indien op de juiste plaatsen aangebracht, een goed en goedkoop hulpmiddel zijn om die plaats-overbepaaldheid te voorkomen.

### De dubbele boutverbinding

Een eenvoudig, doch in de praktijk van de werktuigbouw dagelijks voorkomend geval is dat van de dubbele (en meervoudige) boutverbinding. Nu geldt, dat constructies die nauwkeurig moeten zijn en blijven, geen hysteresis mogen vertonen, d.w.z. geen geheugen mogen hebben voor voorafgaande belastingen. Platen, die door bouten op elkaar zijn getrokken, zullen in het algemeen contactzone's vertonen met naar nul aflopende

aanlegdruk. Optredende verschuifneiging zal het eerst in gebieden met lage vlaktedruk aanleiding geven tot lokale microslip. Daarom moet men het oplegvlak zo dimensioneren, dat de aanlegdruk in principe overal aanwezig is en voldoende groot om slip te voorkomen. Smalle tussenlegringen b.v. brengen de trekkracht van de bout als drukkracht over een gedefinieerd oppervlak over op de plaat, de druk  $\sigma_d$  is egaal verdeeld en hoog, waardoor een schuifspanning  $\tau < \mu \sigma_d$  zonder microslip kan worden opgenomen.

Als niet alleen krachten maar ook koppels moeten worden overgebracht ontstaat behoefte aan minstens twee van zulke verbindingen, liefst op zo groot mogelijke onderlinge afstand. Dan echter dreigt plaats-overbepaaldheid en tengevolge van uitzettingsverschillen kan dan zelfs in een sterk aangehaalde boutverbinding nog verschuiving optreden. Dit is te voorkomen door een elastisch element in te voeren zoals afgebeeld in figuur 9.



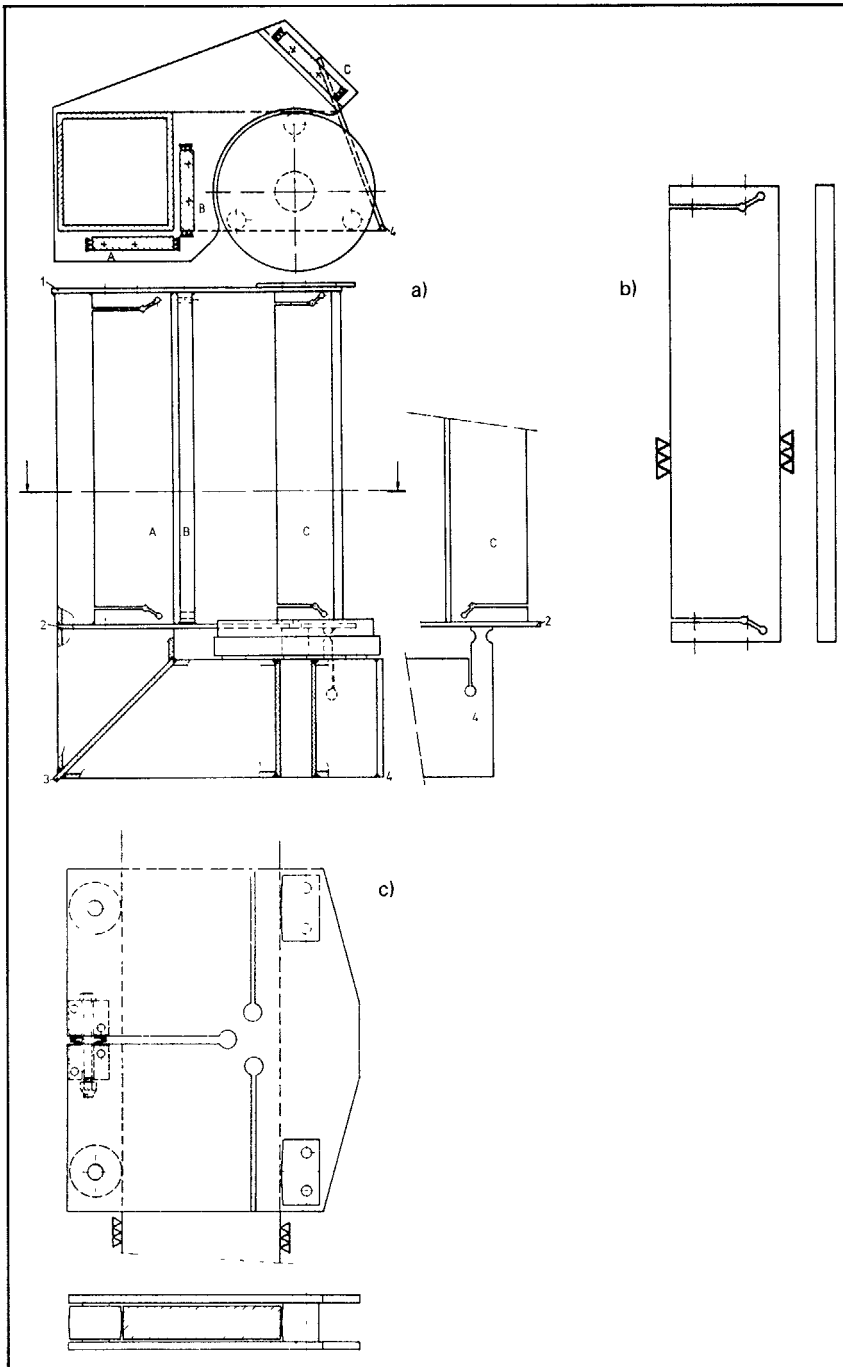
Figuur 9 Elastisch element ter voorkoming van plaats-overbepaaldheid bij een dubbele boutverbinding

### Machine-frame

In figuur 10 is een frame afgebeeld voor een gereedschapswerktuig, in dit geval een centerslijpmachine, ontworpen door H.J. in 't Zand (groep WP, THE).

Uitgangspunt bij dit ontwerp was het feit, dat het gezamenlijk nauwkeurig vlak-slijpen van hoogkante stalen strippen (A, B en C) relatief goedkoop is. Deze hoogkante strippen worden van elastische oplegscharnieren voorzien volgens figuur 10b, zodanig dat vastschroeven of zelfs vastlassen van de eindvlakken geen afbreuk doet aan de rechtheid van de geslepen zijkant.

Een kokerprofiel van 250  $\square$  wordt in drie stukken gezaagd en na aanbrengen van twee eind- en twee tussenvlakken (1, 2, 3 en 4) weer aaneengelast (figuur 10a). De strippen A en B worden tussen de vlakke platen 1 en 2 gelast; strip C wordt alleen aan plaat 2 gelast en pas aan plaat 1 bevestigd na instellen door b.v. in de beide uiterste standen de evenwijdigheid te meten van een (in de door A en B gevormde V-gleuf en op C) opgelegd hulpgereedschap.



De dwarsarm van de kokerbalk draagt op drie instelbare oplegvlakken een draaitafel. Het eindvlak 4 draagt tevens vlak 2 en strip C (via elastische scharnieren om plaats-over-bepaaldheid te voorkomen (zie detail)). Zo wordt voorkomen dat C evenwijdig aan zichzelf gaat trillen door uitbuigen van 1 en 2.

De slede is elastisch voorgespannen op elk der strippen A en B opgelegd op 2 oplegvlakken (bolstraal 1 m) en op C op één zo'n oplegging (figuur 10c).

De constructie biedt, dankzij statisch bepaald konstrueren, een aantrekkelijke oplossing t.a.v. nauwkeurigheid, stijfheid en maakbaarheid.

Het is natuurlijk niet mogelijk - zeker niet in het bestek van dit artikel - de constructeur t.a.v. het werken met elastische scharnieren een pasklaar recept aan te bieden. Elk ontwerp vraagt immers een specifieke benadering.

Ik hoop echter met dit artikel een aantal ideeën, over het konstrueren met elastische scharnieren, zoals die ontwikkeld zijn door prof. ir. W. van der Hoek en zijn groep WP aan de Technische Hogeschool Eindhoven, nader onder de aandacht van de constructeur te hebben gebracht.

◀ *Figuur 10 Een machine-frame. Statisch bepaald konstrueren m.b.v. elastische scharnieren.*