jaargang 32, nummer 5

Mikroniek

NVFT

VAKBLAD VOOR FIJNMECHANISCHE TECHNIEK

ROSAT – Ultraprecisie-verspanen

Vrijheidsgraden – Rechtgeleidingen

De NVFT

Leden van de NVFT zijn technici die op professionele en bedrijfsmatige wijze hoogwaardige apparatuur ontwerpen, ontwikkelen en fabriceren, zowel consumenten- als kapitaalgoederen. Zij zijn van alle opleidingsniveaus en hebben gemeen dat ze gefascineerd zijn door de fijnmechanische techniek, waarbij door integratie van technieken als mechanica, optica, elektronica en glastechniek, zeer geavanceerde produkten ontwikkeld worden. Specifieke kennis uit het vakgebied wordt uitgedragen door leden die werkzaam zijn in het technisch onderwijs.

- De NVFT informeert haar leden over ontwikkelingen in het vakgebied door regionale bijeenkomsten, cursussen, symposia en publikaties in Mikroniek.
- Een speciale service is de **Mikropool**. Door onderlinge dienstverlening heeft men de beschikking over bijzondere, moeilijk in kleine hoeveelheden verkrijgbare materialen en specialistische bewerkings-technologieën.
- NVFT-leden krijgen korting op de door de NVFT georganiseerde activiteiten, evenals op de activiteiten van andere verenigingen waarmee de NVFT een samenwerkingsovereenkomst heeft.
- De NVFT kent bedrijfs- en persoonlijke lidmaatschappen. Voor studenten en gepensioneerden geldt een bijzonder tarief.

Inlichtingen:
Secretariaat NVFT, Postbus 6367, 5600 HJ Eindhoven,
tel.: 040 – 473659 fax.: 040 – 460645.

ADVERTEREN?

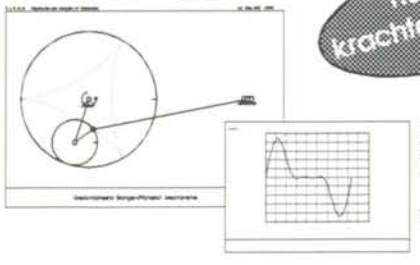
Ruim 2000 FMT'ers lezen

Mikroniek

Mechanismen Analyse op de PC

SAM 2.0

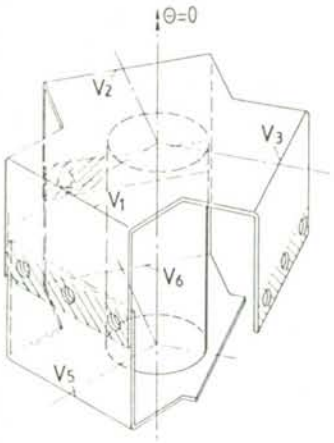
nu ook krachten-analyse



Gebruikersvriendelijke analyse van willekeurige stangen- en planetaire mechanismen

v.a. hfl. 599,-

ARTAS - Technical Application Software Het Puyven 162 * 5672 RJ Nuenen * tel/fax 040-837552



Zie pagina 132

In dit nummer

127 Editorial
A.J.A. Vandenput

128 Verenigingsnieuws, feiten, data, mensen

132 Constructies voor het nauwkeurig bewegen en positioneren (8)
P.C.J.N. Rosielle, E.A.G. Reker, M.P. Koster

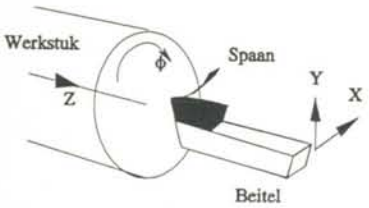
135 Verbeteren van de bewerkingsnauwkeurigheid bij ultraprecisie-verspanen
J. Franse

141 De röntgenastronomie-satelliet ROSAT
Dieter Reinhardt

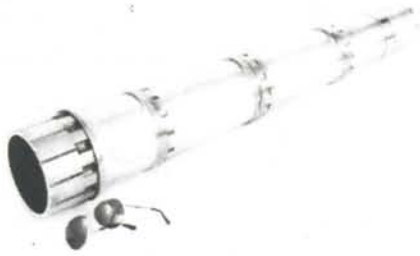
148 Her en Der
Online meten van de zethoek

149 Statisch bepaalde rechtgeleidingen berustend op afrolling bedoeld voor nauwkeurig positioneren
E.A.G. Reker

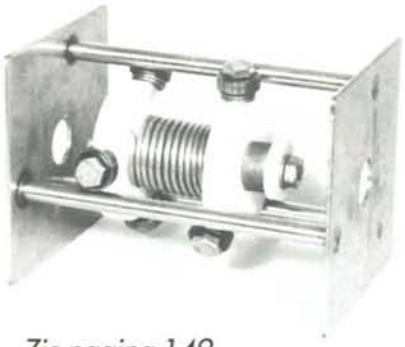
154 Produktinfo



Zie pagina 135



Zie pagina 141



Zie pagina 149

Bij de foto van de voorpagina:

ROSAT-spiegel op de polijstmachine bij Carl Zeiss, Oberkochen (zie pagina 141).

DC Motor Controller board

+

DC Mike Drive

=

PRECISIE POSITIONEREN

- Met de C 812, DC motor controller insteekkaart is een 4-assige programmeerbare precisie positionering mogelijk
- 4 DC motoren, 12V-3W, kunnen worden aangestuurd
- programmering middels ASCII
- DC Mike Drives in 10, 25 en 50 mm uitvoering
- reproduceerbaarheid van 0,1 micron

PHYSIK INSTRUMENTE

is uw partner

Laat u uitnodigen tot een oriëntatie.

Voor uitgebreide informatie en produktkatalogus:

Tel. (31) 4959 3300
Fax (31) 4959 1153

APPLIED **LASER** TECHNOLOGY

main supplier

Onze specialiteit is micro-assemblage van functionele componenten met buitenafmetingen tot maximaal 40x42x50 mm. Liefst met electronica/optica geïntegreerd.

Onze fijnmechanische kennis van serieproductie en assemblage is gebaseerd op onze intensieve contacten met de Zwitserse fijnmechanische industrie. Daardoor zijn wij tevens in staat u bij de engineering en product-optimalisatie ter zijde te staan.

GROOT IN HET KLEINE

micro montage

Postbus 3108 - NL 3760 DC SOEST - Holland

DENK NOU NIET DAT U MET UW HOOGGLANS- EN OPTISCH POLIJSTWERK BIJ ONS NIET WELKOM BENT

Polgron Optics and Polishing Techniques is de enige onderneming in Nederland die zelfstandig hoognauwkeurig polijstwerk verricht. Het polijsten van produkten met een oppervlakteruwheid van Ra 0,001 tot 0,002 micrometer en een vormnauwkeurigheid van 0,05 micrometer is met de door ons ontwikkelde techniek niet alleen haalbaar voor vlakke, maar zelfs voor sferische en a-sferische vormen. Die kunst laten we niet afkijken. Evenmin gunnen we u een blik op prototypes of matrijzen van de meest gerenommeerde bedrijven die bij ons op de werkbank kunnen staan. Wellicht voor u juist de verzekering dat uw opdracht bij Polgron in goede handen is.

P O L G R O N

OPTICS & POLISHING TECHNIQUES

Het grove onderscheid op 0,002 micrometer.

Zernikepark 2-4, 9747 AN Groningen, tel. 050-745758 fax 050-654596

PEMAMO Precisie Hoonapparatuur vanaf 0,6 mm

- mikrometrisch fijn verstelbaar
- verstelling direkt afleesbaar
- herhalingsnauwkeurigheid 0,001 mm
- hoogste precisie en oppervlaktekwaliteit voor iedereen bereikbaar
- ook geschikt voor gebruik op boormachines, draaibanken, freesbanken, e.d.

814: handbediend, bereik 0,6-1,5 mm
220: handbediend, bereik 1,5-20 mm
1040: handbediend, bereik 11-70 mm
AR-340: electronisch, bereik 1,5-70 mm

PEMAMO Precisie Diamant Hoondoorns

vanaf 0,6 mm t/m 80 mm voor doorgaande gaten
vanaf 2,5 mm t/m 80 mm voor blinde gaten
vanaf 5,0 t/m 70 mm voor konische gaten

Met ***PEMAMO*** *gaat het* ***EENVOUDIGER SNELLER NAUWKEURIGER***

Technische Handelsonderneming J. KRIJGSMAN

v. Blommesteijnstraat 25 - 3087 BX Rotterdam
Tel. 010-4950933* - Fax 010-4950494

Mikroniek

Orgaan van de

NVFT

vereniging voor
Fijnmechanische Techniek

Uitgave:
NVFT

Redactie:
Dr. Ing. D. Blank
Ir. S. van de Graaf (hoofd redactie)
Drs. K.J. Groenewolt
H.M.C. Heubers
Ir. P.C.J.N. Rosielle
H.G.J. Rutten
Ir. J.J. Veerman
G.J. Verschragen

Redactiesecretariaat:
Mikroniek
Postbus 80.004
3508 TA Utrecht
Telefoon 030-531 710 / 531 639

Redactie-adviesraad:
Prof.Ir. A. Anemaat
Prof. L.H.J.F. Beckman
Prof.Dr.Ir. H.F. van Beek
Prof.Dr.Ir. J. Bleeker
Ing. H. Bosch
Ir. P. Brinkgreve
Ing. M.F. Dierselhuis
Prof.Ir. C. Heuvelman
Ir. D. de Hoop
A. Meijering
Dr.Ir. J.A. Rietdijk
Prof.Dr.Ir. P.H.J. Schellekens
Prof.Dr.Ir. Ch. Snijders
Ir. G. Vaessen
Prof.Dr.Ir. A.J.A. Vandenput
Ir. D. van't Veen

Advertenties en Abonnementen:
Mikroniek
J. Verkerk
Postbus 80.004
3508 TA Utrecht
Telefoon: 030-531 710 / 531 639
Fax: 030-522 267
Postgiro:3488776
T.n.v. Techno Press
Amsterdam
Abonnementskosten Mikroniek:
Nederland ƒ100,-- per jaar
Buitenland ƒ125,-- per jaar
Alle prijzen excl. BTW

Secretariaat NVFT
Postbus 6367
5600 HJ Eindhoven
Telefoon: 040-473 659
Fax: 040-460 645

Vormgeving:
Jurriaan Bol Design, Son

Lay-out en realisatie:
Twin Design B.V.
Oostersingel 35a
4101 GH Culemborg
Telefoon: 03450-19525
Fax: 03450-13480

Mikroniek verschijnt zes maal per jaar

ISSN 0026-3699

© Niets van deze uitgave mag overgenomen of vermenigvuldigd worden zonder nadrukkelijke toestemming van de redactie.

Editorial

Kleine elektrische aandrijvingen

In de elektrische aandrijftechniek bestaat tegenwoordig een sterke drang naar miniaturisering. De universitaire en industriële onderzoeksinspanningen richten zich vooral op de medische toepassingen, de ruimte- en luchtvaart, de gegevensopslag, de audio- en video-apparatuur en de automobielindustrie.
Men blijft tegelijkertijd de nadruk leggen op reactiesnelheid en nauwkeurigheid. Bovendien streeft men naar een grote flexibiliteit bij het genereren van translerende en/of roterende bewegingen met beperkte en/of onbeperkte slag en naar de mogelijkheid om een ingewikkeld functioneel verband te creëren tussen de beweging van het aan te drijven element en die van de actuator.
De hoge reactiesnelheid verkrijgt men o.a. door gebruik te maken van elektronische omvormersystemen met de modernste halfgeleidercomponenten, die worden gekenmerkt door een grote vermogenscapaciteit en een hoge schakelfrequentie. Snelheid- en/of positiesensoren met hun terugkoppelketen, eventueel ondersteund door een feed forward referentiemodel, garanderen de nauwkeurigheid. Men maakt de aandrijving flexibel door elk moment afzonderlijk te voorzien van een elektrische actuator. Een besturingssysteem, al dan niet voorzien van een computer, verwezenlijkt het eerder vermeld functioneel verband.
Zowel in de ontwerpfase als tijdens de inbedrijfstelling en de eigenlijke werking is blijkbaar een mechatronische aanpak een conditio sine qua non, met als voornaamste disciplines: de elektro-mechanica, de elektronica, de regel- en informatietechniek. De digitaal signaalprocessoren dringen daarenboven in snel tempo door in de wereld van de elektrische aandrijftechniek. De elektrische motor blijft weliswaar het werkpaard van de aandrijving, maar is slechts een onderdeel(tje) van het geheel. Hierbij mag men dan niet uit het oog verliezen dat elk onderdeel misschien wel aan de grens van de perfectie zou kunnen werken, maar dat de problemen pas te voorschijn zullen komen bij de samenbouw van het geheel. Deze graad van multidisciplinariteit alsook de toepassing van nieuwe technologieën stijgen omgekeerd evenredig met de afmetingen van de aandrijving.
Denken we maar even in het gebied van de elektromagnetische mini-motoren aan de fabricage van heel kleine magneetjes met een diameter van een paar millimeter en tientallen pooltjes en het wikkelen of etsen van spoeltjes. De desbetreffende meet- en testapparatuur stelt uiteraard problemen van dezelfde omvang. Op dit ogenblik wordt de bouwhoogte van een klein elektrisch aandrijfsysteem mede bepaald door de hoogte van de motoren. Hoogwaardige magnetische materialen, die de laatste tien jaar al met een factor 10 zijn verbeterd, spelen een belangrijke rol in het volume, het gewicht en per slot van rekening ook in het rendement. Spreken over het rendement van een elektrische aandrijving in het bereik van een paar tientallen Watt heeft misschien weinig zin. Men kan zich echter wel de vraag stellen hoeveel miljoenen barrels olie per jaar in de eenheidsmarkt van de Europese Gemeenschap zouden kunnen worden bespaard als men het rendement van de afzonderlijke kleine elektrische aandrijvingen met een paar procent verbetert. In het domein van de micro-motoren tenslotte wordt veel verwacht van de op de siliciumtechnologie gebaseerde elektrostatische motoren. De uitdaging, zowel wat het ontwerp als de toepasbaarheid betreft, neemt hier drastisch toe. Een mechatronisch opgeleide en ingestelde ingenieur zal die evenwel met plezier aangaan.

Prof. dr. ir. A.J.A. Vandenput
TU Eindhoven, Faculteit Elektrotechniek,
Afdeling Elektrische Energietechniek,
Vakgroep Elektromechanica en Vermogenselektronica.

Verenigingsnieuws

NVFT-themadag

Op **18 november 1992 wordt in Utrecht** een themadag **Fijnmechanische Constructies** georganiseerd voor de regionale werkgroepen Gelderland en Utrecht.
Aan de orde komen de volgende onderwerpen:
- Statisch bepaald construeren,
- Het beheersen van vrijheidsgraden.
- Manipuleren en instellen.
- Elastische elementen,
- Het verwijderen van speling.
- Construeren op stijfheid.
- Bijzondere constructies.

Aan de hand van voorbeelden, modellen en gerealiseerde constructies zal de theorie van deze onderwerpen worden toegelicht door ir. P.C.J.N. Rosielle en ir. P. Brinkgreve, TU Eindhoven. Beide hebben een grote ervaring in het ontwerpen en realiseren van bijzondere constructies.
Het programma werd eerder (1 oktober j.l.) te Eindhoven gepresenteerd en genoot grote belangstelling.

Aanmelding bij het secretariaat van de NVFT. Zie ook de aankondiging elders in dit blad.
Kosten inclusief lunch: leden NVFT f 125, studenten f 50, niet-leden f 250.

Deze themadag wordt op 13 januari 1993 gehouden voor de regio's Twente en Groningen, en op 17 februari 1993 voor de regio's Amsterdam en Leiden.

Regionale werkgroep Amsterdam

Themaavond **Lasermeettechniek** op donderdag **29 oktober 1992, van 19.45 tot 22.00 uur** in het ARISTO Zalencentrum, Teleportboulevard 100, Amsterdam.
In een tweetal lezingen zal het principe, de werking en de mogelijkheden van Keyence verplaatsingsensoren en laserscanners worden behandeld. De avond wordt aangeboden door de firma GEVEKE Elektronics. De Teleportboulevard is te bereiken via de afslag N103 (N5 Haarlem) of S102 (Sloterdijk) van de A10-west.

Aanmelden bij:
W. Mels
Telefoon: 020 - 54 85 333

Regionale werkgroep Utrecht

Bedrijfsbezoek op 24 september j.l. aan Fokker Space & Systems B.V. (FSS) door circa 50 deelnemers.
FSS is één van de zes zelfstandige werkmaatschappijen onder een holding van N.V. Royal Dutch Aircraft Factories Fokker; FSS heeft 440 medewerkers en een omzet van 110 miljoen gulden.
De ontwikkelingen binnen FSS zijn van hoog technologische inhoud en omvatten ondermeer de volgende vakgebieden: robotica, raketstructuren, microgravitatie, zonnepanelen en control systems.

Om een indruk te krijgen van een ontwikkeling binnen FSS werd het project zonnepanelen belicht. Deze panelen zorgen voor de stroomvoorziening van satellieten; een essentieel onderdeel ervan is het thermisch "mes".
Dit thermisch mes zorgt ervoor dat de panelen in de ruimte uitgeklapt worden vanuit de satelliet. Het systeem berust op het doorsmelten van een kevlar kabel met behulp van twee thermische messen. Als de satelliet na lancering in de goede baan is beland wordt de kabel, waar de messen met een voorspankracht tegen aandrukken, binnen één minuut doorgesmolten.
Tijdens de ontwikkeling is met de volgende aspecten rekening gehouden: extreme temperatuurvariatie in de ruimte, afhankelijk van de stand van de zon, de temperatuurvariatie tijdens het doorsmelten van de kabel en de krachten en trillingen die ontstaan tijdens de lancering, waarbij rekening gehouden moet worden met 4 g.

De gloeidraad van het mes is het belangrijkste onderdeel. Deze gloeidraad is in samenwerking met een toeleverancier van FSS, Hymec bv Sittard, ontwikkeld. Deze firma is actief in het ontwerpen, "meedenken" en toeleveren van produkten waarbij met zeefdruk opgebrachte dikkefilm-patronen als elektrisch circuit toegepast worden. De heer Visschers van deze firma was aanwezig, vertelde de geschiedenis van het mes en besprak de constructie en vervaardiging ervan.
Op een keramisch plaatje (aluminiumnitride) wordt met behulp van de dikkefilmtechniek een gloeidraad van palladiumgoud aangebracht. Om breuk tijdens het opgloeien te voorkomen, is gekozen voor een aluminiumnitride ondergrond vanwege de lage uitzettingscoëfficiënt en goede thermische geleidbaarheid. Voor de stroomvoorziening worden twee RVSstaafjes aangebracht, die door middel van clips op het keramisch plaatje zijn bevestigd. De behuizing en het binnenwerk van het mes worden met behulp van hittevaste lijm geassembleerd.

Na deze voordracht gingen we per bus naar Schiphol voor een rondleiding door de stofarme ruimten, die normaal niet voor bezoekers toegankelijk zijn. In deze ruimten worden de zonnepanelen gebouwd. Tijdens de rondleiding werd uitleg gegeven over verschillende technieken die in de ruimtevaart worden toegepast en werden vele vragen beantwoord.

Met dit bezoek kregen we een goede indruk van het geavanceerde werk op ruimtevaart gebied bij Fokker Space & Systems. Onze dank daarvoor, en voor het geven van een voorbeeld dat uitbesteden zich kan ontwikkelen tot een "samenwerkingscultuur".

Fritz de Wit

Actueel

Geslaagd voor de cursus FMT

Op donderdag 24 september kregen tien geslaagden het door hen felbegeerde diploma van de twee-jarige cursus Fijnmechanische Techniek uitgereikt. Zij werden, behalve door de cursusleiding, ook toegesproken door dr. ir. J.A. Rietdijk, van het Mechatronicaplatform en door dr. ir. J. Verkerk van de Nederlandse Vereniging voor Fijnmechanische Techniek (NVFT).

Traditie sedert 1973
De Hogeschool Utrecht is een marktgerichte hogeschool met opleidingen in economie, natuur en techniek. Deze hogeschool heeft 7.000 studenten, 650 personeelsleden en onderwijslokaties in Utrecht en Hilversum. In Hilversum (de voormalige Christelijke HTS-Hilversum) wordt sedert 1973 Fijnmechanische Techniek als profiel van de Werktuigbouw gegeven.
De hogeschool heeft – direct naast het station Overvecht in Utrecht gelegen – een apart cursusinstituut voor na- en bijscholing dat onder de naam Posttertiair Onderwijs-Utrecht (PTO-U) een aantal specialistische technische en managementcursussen verzorgt.
Eén van deze cursussen is de eerder genoemde tweejarige opleiding "Fijnmechanische Techniek".

Cursus mechatronica
De inhoud van bovengenoemde cursus is geheel aangepast en wordt onder de naam "FMT/Mechatronica" in 1992-1993 als éénjarige cursus van 180 uur aan de Hogeschool Utrecht bij PTO-U gegeven.
De cursus is bestemd voor werktuigbouwers of andere gelijkwaardige technici, die betrokken zijn bij of interesse hebben in het ontwerpen van mechatronische producten. Bij de behandeling van ontwerpconcepten zullen zoveel mogelijk relevante technieken geïntegreerd worden.
Deze, zeg maar synergetische, aanpak moet leiden tot een hoogwaardig mechatronisch product, waarbij de gebruikte kennis van fijnmechanische techniek, elektronica, informatica, optica en andere vakgebieden optimaal is toegepast.

Integrale ontwerpaanpak
De integrale ontwerpaanpak betekent aandacht voor de volgende onderwerpen:
- fijnmechanische constructie-elementen,
- elasticiteit en stijfheid van constructies,
- fabricagetechnieken en materiaalkeuze in de fijnmechanische techniek,
- modelvorming en simulatie,
- meettechnieken, ook uit de optica,
- verwerking en beoordeling van meetresultaten,
- elektronica en besturingstechniek,
- sensoren en actuatoren,
- servosystemen,
- mechatronisch ontwerpen (integratie van de opgedane kennis en kunde).

De lessen worden verzorgd door universitaire- en hogeschooldocenten, maar ook door specialisten uit het bedrijfsleven.

Voor nadere informatie:
Cursusinstituut PTO-U
van de Hogeschool Utrecht,
Tiberdreef 8, 3561 GG Utrecht
Telefoon: 030 - 660 254
Fax: 030 - 628 418

Geslaagden van de tweejarige cursus Fijnmechanische Techniek van het cursusinstituut PTO-U van de Hogeschool Utrecht ontvingen op 24 september hun felbegeerde diploma.

Rectificatie

In het vorige nummer Mikroniek 32(1992)4 zijn enkele fouten geslopen die om correctie vragen.
Het betreft het artikel "Construeren voor het nauwkeurig bewegen en positioneren (7):
- pagina 102, linker kolom, onder de eerste twee figuren: de vermelding $(x + \rho)$ moet zijn $(x + \varphi)$.
- pagina 103: rechter kolom, de zinnen "•In uitvoering met sprieten is dit een correct kruisveerscharnier" en "•Correct kruisveerscharnier". Dit zijn slechts opmerkingen en hadden in klein lettertype moeten staan zònder indelingspunt.

Onze excuses daarvoor.

PATO-cursussen

Proefopzetten, klassiek en taguchi

Vierdaagse cursus op 30 oktober en 6, 13, en 20 november 1992 in Eindhoven.
Doelstelling: het presenteren van een inleiding in het opzetten van experimenten waarbij de invloed van een aantal factoren tegelijkertijd wordt onderzocht.
Bestemt voor: onderzoekers in (ontwikkelings)laboratoria en proeffabrieken. Statistische basisbegrippen als schatten, nulhypothese, normale verdeling en onbetrouwbaarheid worden bekend verondersteld.
Cursusleider: dr. J.B.Dijkstra (TU Eindhoven, Rekencentrum).
Deelnamekosten: *f* 2.115,—

Projectmanagement

Driedaagse cursus op 3, 4 en 5 november 1992 in Oisterwijk.
Doelstelling: deelnemers kennis en inzicht te verschaffen met betrekking tot het conceptuele kader van projectmanagement, de moderne methoden en technieken die bij projectmanagement worden toegepast, de kritieke succesfactoren en de rol van projectmanagement bij voorbereiding en uitvoering van projecten, en een verantwoorde keus van geautomatiseerde hulpmidde-

len bij projectmanagement.
Bestemd voor: leidinggevende- en staffunctionarissen (TH/HTO) in bedrijven, instellingen en bij de overheid, die betrokken zijn bij de voorbereiding, planning of uitvoering van projecten en die zich willen (her)oriënteren op de snelle ontwikkelingen in het vakgebied van projectmanagement.
Cursusleiding: ir. drs. J.I.M. Halman en ir. L.H. Kroep (TU Eindhoven).
Deelnamekosten: ƒ 2.295,—

Kwaliteitsprocedures

Tweedaagse cursus op 4 en 5 november 1992 in Arnhem.
Doelstelling: deelnemers vertrouwd te maken met een methode om de kwaliteit van procedures te verbeteren, opdat de risico's in een willekeurig proces zo beperkt mogelijk blijven. De methodiek kan binnen het kader van ISO-9000 kwaliteitssystemen worden toegepast, maar ook daarbuiten.
Bestemd voor: staf- of lijnfunctionarissen en kwaliteitsfunctionarissen die processen op kwaliteit wensen te verbeteren. Het gevolgd hebben van een specifieke studierichting of kennis van ISO-9000 normen is niet vereist.
Cursusleider: ir. R.W. van Otterloo (KEMA).
Deelnamekosten: ƒ 1.325,—

Financieel management en toegepaste bedrijfseconomie

Vierdaagse cursus op 9, 10 en 23, 24 november 1992 in Enschede.
Doelstelling: technici in kort tijdsbestek relevante bedrijfstechnische kennis aan te reiken. Daarbij zullen de diverse bedrijfseconomische theoriën vooral vanuit een practische invalshoek worden behandeld en zoveel mogelijk worden toegepast op specifieke bedrijfstakken waarin technologen werkzaam zijn.
Bestemd voor: technici (TU/HTO) met ca. vijf jaar ervaring, die willen doorgroeien naar een algemeen managementfunctie en zij die reeds een algemeen management functie vervullen.
Cursusleider: prof. dr. J. Bilderbeek (TU Twente, Fac. der Bedrijfskunde).
Deelnamekosten: ƒ 2.395,—

Management van technische innovatie

Driedaagse cursus op 10, 11 en 12 november 1992 in Oisterwijk.
Doelstelling: de cursus is bedoeld om technici aanvullende bedrijfskundige kennis te geven omtrent de moderne inzichten van het innovatieproces. Onder innovatie wordt verstaan zowel het ontwikkelen van nieuwe produkten als het verbeteren van bestaande.
Bestemd voor: hogere staf- en lijnfunctionarissen die te maken krijgen/-hebben met de problematiek van innovatie. Gedacht wordt aan directeuren van kleinere bedrijven, managers van ontwikkelafdelingen, ontwikkelaars van middelgrote en kleine bedrijven, bedrijfsleiders en produktiechefs.
Cursusleider: ir. D. Grootjans (TU Eindhoven, Fac. Bedrijfskunde).
Deelnamekosten: ƒ 2.310,—

Marketing en techniek

Driedaagse cursus op 10, 11 en 12 november 1992 in Lisse.
Doelstelling: deelnemers vertrouwd te maken met technische marketing. In de cursus wordt ruime aandacht gegeven aan de practische toepassing door middel van caeses en oefeningen. De cursus verschaft practische denkkaders en concepten voor het meer gericht en systematisch omgaan met marktonzekerheden.
Bestemd voor: ingenieurs (TU/HTO) die zich in kort tijdsbestek vertrouwd willen maken met marketing en het daarbij gehanteerde begrippenkader.
Elementaire voorkennis is niet vereist.
Cursusleider: prof. dr. H.W.C. van der Hart (TU Eindhoven en senior adviseur/firmant Holland Consulting Group in Amsterdam).
Deelnamekosten: ƒ 2.380,—

Voor nadere informatie over deze cursussen:
Bureau Stichting PATO
Telefoon: 070-3644957.

TELEAC-cursussen

Schoner produceren

De achtdelige cursus start op 14 november 1992 met acht TV-uitzendingen op TV2 van 10.30-11.00 uur, de radio-uitzendingen starten op 18 november 1992 op Radio 5 van 22.00-22.30 uur
Doelstelling: het behandelen van de nieuwste ontwikkelingen op het gebied van een milieubewuste bedrijfsvoering. Het betreft: kennis van methoden om produktieprocessen door te lichten, inzicht in de samenhang tussen produktieprocessen en milieu, en kennis van methoden en technieken om schoner te produceren, vaardigheden in het opstellen van het bedrijfsmilieuplan.
Bestemd voor: ondernemers en leidinggevende functionarissen (in het midden- en kleinbedrijf), die verantwoordelijk zijn voor de produktie (zowel het produktieproces als het produkt).
Kosten: het cursusboek, inclusief werkboek, kost ƒ 145,— (ISBN 90 6533 297 9).

Ziekteverzuim

De acht TV-uitzendingen starten op dinsdag 17 november op TV2 wekelijks van 23.25-23.55 uur, de radio-uitzendingen op 11 november 1992 op Radio 5 van 22.30-22.45 uur.
Doelstelling: de cursus levert een plan van aanpak voor het terugdringen van ziekteverzuim. Er staan een aantal nieuwe wetten en maatregelen op stapel. Een aantal van deze maatregelen is reeds ingevoerd, zoals bijvoorbeeld het bonus-malussysteem, waarbij onder andere de ondernemer "gestraft" wordt met hogere premies als het ziekteverzuim en de arbeidsongeschiktheid boven de norm zijn.
Bestemd voor: leidinggevende functionarissen en ondernemers in het Midden- en Kleinbedrijf.
Kosten: het cursusboek kost ƒ 80,— (ISBN 90 6533 295 2).

Kwaliteitsmanagement

De acht TV-uitzendingen starten op 26 november 1992 op TV2 wekelijks van 23.25-23.55 uur, de radio-uitzendingen op 9 december 1992 van 21.00-21.30 uur op Radio 5.
Doelstelling: kennis en ideeën overbrengen, die noodzakelijk zijn om in een organisatie een kwaliteitsproces op gang te brengen, vast te houden en verder uit te bouwen. De cursus stelt de klant centraal in het kwaliteitsdenken. Aan de orde komen onder andere menselijke aspecten als "samenhang" en "leiderschapsstijlen" maar ook de ISO-normen, de organisatiestructuur, de statistische methoden en de beheersingsmechanismen.
Bestemd voor: de cursus is gericht op het middenkader van het Midden- en Kleinbedrijf (MBO-niveau) en is vooral praktisch.
Kosten: het cursusboek kost ƒ 160,— (ISBN 90 6533 292 8).

Nieuw burgelijk wetboek

De acht TV-uitzendingen starten op 6

december 1992 op TV2 van 23.05-23.35 uur, de radiouitzendingen starten in februari 1993 op Radio 5.
Doelstelling: het Nieuw Burgerlijk Wetboek bevat voor het bedrijfsleven belangrijke onderwerpen als aansprakelijkheid uit onrechtmatige daad, het kooprecht, zekerheidsrechten, het contractrecht en algemene voorwaarden. Met ingang van 1 januari 1992 zijn vele wijzigingen in onder meer het vermogensrecht, het personen- en familierecht, het rechtspersonenrecht, het executie- en beslagrecht en het faillisementsrecht doorgevoerd.
Bestemd voor: ondernemers en functionarissen in het Midden- en Kleinbedrijf, die te maken hebben met contracten, algemene voorwaarden, aansprakelijkheid en dergelijke.
Kosten: Het cursusboek kost *f* 75,— (ISBN 90 6533 299 5).

Voor nadere informatie over deze cursussen:
Teleac, Utrecht
Telefoon: 030-946946.
De boeken zijn te koop in de boekhandel of te bestellen door overmaking op postgiro: 54 42 32, ten name van Teleac, Utrecht onder vermelding van de titel van het boek.

Delftse propaedeusevestiging in Amsterdam

De faculteit der Werktuigbouwkunde en Maritieme Techniek van de TU Delft heeft dit studie jaar haar poorten geopend bij de Technische en Maritieme Faculteit van de Algemene Hogeschool Amsterdam met een nieuwe propaedeusevestiging.
Voor ongeveer 40 nieuwe studenten worden colleges en practica gegeven door docenten van de faculteit in Delft en van de hogeschool in Amsterdam. Voor colleges Maritieme Techniek zullen docenten van de Hogeschool Haarlem een bijdrage leveren. Na èèn jaar studie stappen de studenten uit Amsterdam over naar Delft.
De Delftse vestiging in Amsterdam dient als voorpost om studenten rond Amsterdam en in Noord-Holland de gelegenheid te bieden hun studie binnen de eigen regio te beginnen.

Non-ferro metalen en extrusie

Themadag, 17 november 1992 in de aula van TU Delft, georganiseerd door de Werkgroep non-ferro metalen van de Bond voor Materialenkennis en het Aluminium Centrum

9.00 h - Registratie en ontvangst.
16.30 h - Sluiting.
Na de opening om 9.30 h door Dr.Ir.P.van Mourik, TU Delft, worden de volgende voordrachten gegeven:
- *Modern extrusions developments.*
  Prof.Dr.T.Sheppard, adviseur Hoogovens Groep IJmuiden.
- *Aspecten van modellering van het extrusieproces.*
  Ir.W.H.Sillekens en Prof.Ir.J.A.G.-Kals, TU Eindhoven.
- *Extrusions, heat treatment and mechanical properties of Al-Li alloys.*
  Dr.Ir.W.Calles, Vereinigte Aluminium Werke A.G. Bonn.
- *Technologische aspecten van extrusie.*
  F.L.J.Weitzel, oud-medewerker van Hunter Douglas en Nedal.
- *Forumdiscussie.*

Tijdens de lunchpauze is er ruimschoots gelegenheid voor een bezoek aan de expositie en poster-presentatie.

Voor nadere informatie:
Bond voor Materialenkennis
W.Parallelweg 390
3930 AJ Zwijndrecht
Tel: 078-192655
Fax: 078-195735

Cursussen, workshops en themadagen Mikrocentrum Nederland

Matrijzen voor kunststoffen B.
Cursus; 17 avonden eens per week; Antwerpen 12 oktober, Eindhoven 13 oktober, Utrecht 27 oktober 1992; MBO met ervaring; kosten *f* 1.850,-
Matrijzen voor kunststoffen A.
Cursus; 16 avonden eens per week; Almelo 26 oktober, Antwerpen 27 oktober, Eindhoven 29 oktober 1992; LBO met ervaring; kosten *f* 1.600,-
Surface mount technology.
Cursus: 6 avonden eens per week; Rotterdam 9 november, Zwolle 10 november; MTO; kosten *f* 950,-
Elektronica-technologie.
Cursus; 8 avonden eens per week; Eindhoven 28 oktober, Rotterdam 26 november 1992; vanaf MBO; kosten *f* 1.140,-
Printed circuit board lay-out.
Cursus; 4 avonden eens per week; Utrecht 5 november, of 2 weken 1 dag: Eindhoven 1 december 1992; MTO; kosten *f* 780,-
Produktieplanning en voorraadbeheer.
Cursus; 6 avonden eens per week; Eindhoven 12 november 1992; vanaf MBO; kosten *f* 830,-
Milieuverantwoord werken in het MKB.
Cursus; 4 avonden eens per week; Rotterdam 29 oktober, Utrecht 24 november 1992; vanaf L.T.O. met ervaring tot M.T.O.; kosten *f* 690,-.
Design for Assembly.
Workshop handmontage; 2 dagen; Eindhoven 19 november 1992.
Workshop automatische montage; 2 dagen; Eindhoven 2 december 1992; kosten telkens *f* 1.340,-.
Succesvol ontwerpen.
Workshop; Rotterdam 11 november, Eindhoven 25 november, Utrecht 2 december; kosten *f* 680,-.
Kostenbeïnvloeding tijdens het ontwikkelingsproces.
Workshop; 3 dagen; Eindhoven 30 oktober 1992; kosten *f* 1.520,-.
Veilige machines en apparaten.
Workshop; Eindhoven 29 oktober 1992; kosten *f* 600,-.
Rapid tool setting.
Workshop; 2 dagen; Eindhoven 12 november 1992; kosten *f* 1.340,-.
Onderhoudstechniek.
Workshop; 3 dagen; Eindhoven 20 november 1992; kosten *f* 1.520,-.
Milieuzorg in het MKB.
Workshop; 3 dagen; Rotterdam 30 oktober, Utrecht 27 november 1992; kosten *f* 1.520,-.
Mechatronica.
Themadag; Beurs World Trade Center Rotterdam; 22 oktober 1992; kosten *f* 495,-.
Automatische produktidentificatie.
Themadag; Beurs World Trade Center Rotterdam; 27 oktober 1992; kosten *f* 495,-.
Programma.
Verschenen is het programma 1992-1993 van cursussen, workshops en opleidingen van het Mikrocentrum Nederland, waarover een overzichtelijk boekwerkje uitgebreide informatie geeft.

Voor nadere informatie (en het aanvragen van het programmaboekje:
Mikrocentrum Nederland,
Kruisstraat 74, 5612 CJ Eindhoven.
Telefoon: 040 - 432 503
Fax: 040 - 450 169.

Fijnmechanische Constructies

Themadag op woensdag 18 november 1992 te Utrecht
voor de regio's Gelderland en Utrecht

Een praktische dag waarbij theorie en praktijk naast elkaar worden gezet.

Waardoor wordt nauwkeurigheid bepaald?
Hoe worden ongewenste vervormingen in een constructie voorkomen?

Oplossingen die gelden ongeacht de grootte van de constructie worden aan de hand van de volgende onderwerpen besproken en met voorbeelden en gerealiseerde constructies verduidelijkt:

- Statisch bepaald construeren
- Het beheersen van vrijheidsgraden
- Manipuleren en instellen
- Elastische elementen
- Het verwijderen van speling
- Construeren op stijfheid
- Enkele bijzondere constructies

De inleiders, ir. P.C.J.N. Rosielle en ir. P. Brinkgeve (TU Eindhoven) hebben een ruime ervaring in het ontwerpen en fabriceren apparaten en systemen volgens deze principes.

Aanmelding voor 8 november 1992 door een kopie van deze ingevulde advertentie te zenden aan het secretariaat van de NVFT.
Kosten inclusief lunch: NVFT-leden f 125, studenten f 50, niet-leden f 250

Hierbij meldt ik mij aan voor de themadag Fijnmechanische Constructies op 18 november 1992 te Utrecht.

Naam en voorletters: _____

Bedrijf : _____

Postcode + plaats : _____

Telefoon: _____

Lidnummer: _____

Datum: _____ Handtekening: _____

Voor betaling van de deelnamekosten wordt een acceptgiro aan u toegezonden.

Verzenden aan: Secretariaat NVFT, Postbus 6367, 5600 HJ Eindhoven of Fax: 040 - 460 645

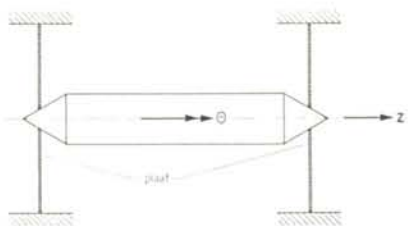
Beheersen van vrijheidsgraden

Constructies voor het nauwkeurig bewegen en positioneren (8)

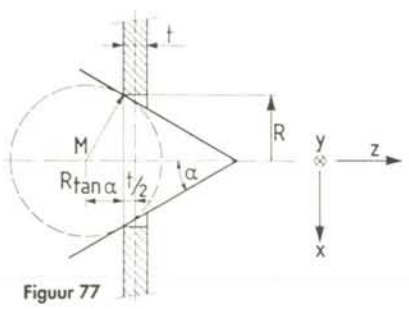
P.C.J.N. Rosielle, E.A.G. Reker, M.P. Koster

Het vastleggen van graden van vrijheid met behulp van elastische elementen.

Wil men bepaalde graden van vrijheid voorschrijven en andere juist vrijlaten, dan zijn elastische elementen vaak zeer geschikte constructiemiddelen. De elastische elementen hebben de eigenschap in bepaalde richtingen een relatief hoge stijfheid aan te bieden, terwijl zij in andere richtingen een zeer lage stijfheid vertonen. De richtingen met hoge stijfheid laat men dan samenvallen met de vrijheidsgraden die men wil definiëren; de richtingen met lage stijfheden met de vrijheidsgraden die men wil vrijlaten. Men dient er wel voor te waken dat men de elastische elementen juist toepast opdat de hoogste respectievelijk laagste stijfheid ook worden aangesproken.
Dat men hier attent op moet zijn illustreert figuur 76, waar het de bedoeling is dat slechts de twee graden van vrijheid z en θ worden vrijgelaten.
De as is echter in de geschetste vorm niet viervoudig overbepaald maar zesvoudig (!) onderbepaald. In feite definieert de contactzone tussen een conus en een star rond gat alleen de ligging van het middelpunt M van de ingeschreven bol, zie figuur 77. Dit punt M ligt op een afstand $(r \cdot tan\alpha + t/2)$ buiten het midden van de veerplaat en alleen *in* dat vlak is de plaats x, y gedefinieerd. M kan in x- en y-richting verplaatsen door een hoekverdraaiing van de veerplaat, zie figuur 77 en figuur 78.
Dóórgetrokken gatranden volgens figuur 79 met een juist gekozen afrondingsstraal brengen M juist in het midden van de veerplaten. Daarmee ligt de hartlijn vast en blijft slechts vrijheid in φ ψ en (beperkt) in z.

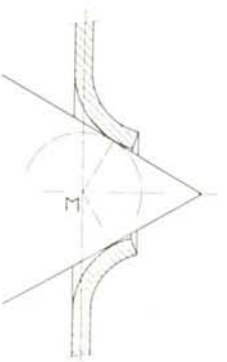


Figuur 76



Figuur 77

Figuur 78

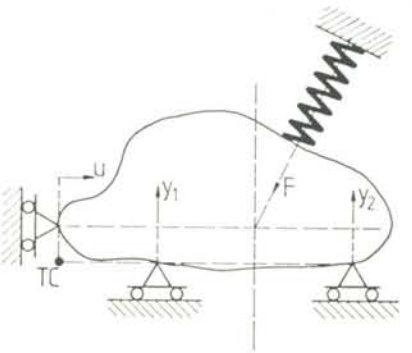


Figuur 79

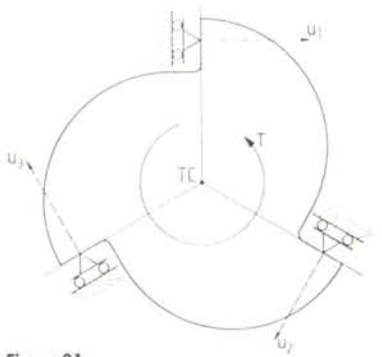
Bij een starre conus kan men dat gat beter iets driehoekig maken, zodat er drie gedefinieerde contactzones ontstaan onder ongeveer 120°. Is de conus elastisch (kunststof) dan kan een rond gat helpen om de ronde vorm van de conus intact te houden.

Het thermisch centrum

In het platte vlak, zie figuur 80 kan men van een star lichaam de stand volledig voorschrijven door het vastleggen van 3 vrijheidsgraden u, y_1, y_2. Hier zorgt een voorspanveer met een kracht *F* voor de krachtsluiting.
Is er sprake van homogene temperatuurverandering van het lichaam en het freem waaraan het is verbonden, en hebben beide verschillende uitzettingscoëfficiënten, dan is het punt TC het enige punt van het lichaam dat ten opzichte van het freem op zijn plaats blijft.



Figuur 80



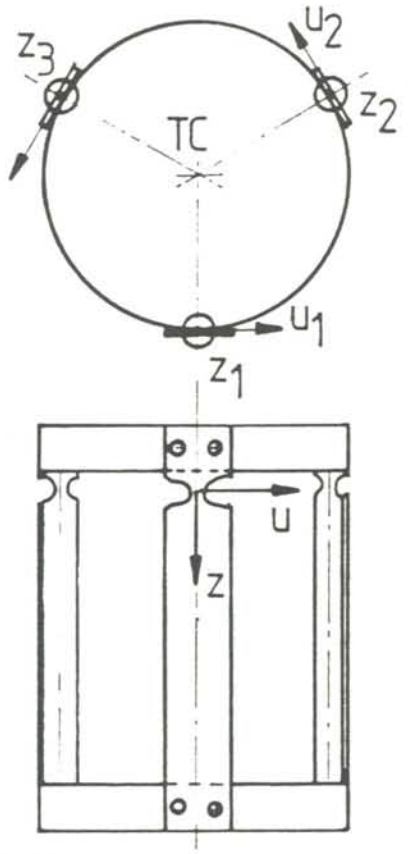
Figuur 81

TC is het thermisch centrum. Constructies worden vaak symmetrisch opgezet opdat men uitzettingsverschillen kan toestaan als de hartlijn dan maar op zijn plaats blijft.
Figuur 81 toont aan hoe dit kan. Hier is een koppel (T) nodig om de krachtsluiting te realiseren. In de oplegpunten worden de 3 vrijheidsgraden u_1, u_2, u_3 vastgelegd. In de radiale zin heerst in elk oplegpunt volkomen vrijheid; het punt TC ligt ten opzichte van de vaste wereld vast.

Thermisch centrum met behulp van elastische elementen.

Een bezwaar dat men nog kan hebben is, dat thermische uitzettingsverschillen aanleiding geven tot relatieve, radiale verschuiving. Om hysteresis in de positionering tot een uiterste te beperken wordt in radiale richting een beroep gedaan op de stijfheid van het lichaam en het relevante freemdeel. Mag de const-

Beheersen van vrijheidsgraden

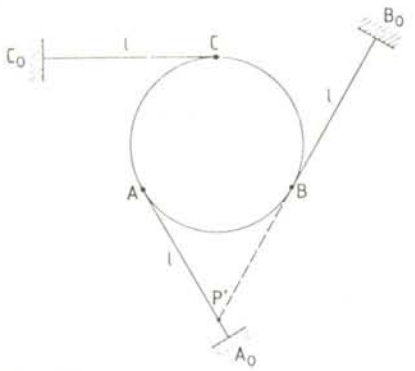


Figuur 82

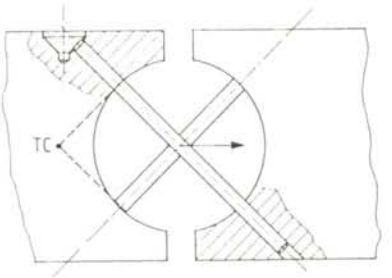
ructie onverbrekelijk zijn dan is figuur 82 een prachtige oplossing.
De hier getoonde bladveren leggen drie keer 2 vrijheidsgraden vast (u en z) In de radiale zin is de stijfheid laag. Het thermisch centrum is nog nauwelijks onderhevig aan hysteresis; waarden van ten hoogste s_v = 1µm zijn gerealiseerd.

Het definieren van een hartlijn in de ruimte.

In plaats van drie identieke aanslagen kan men de wrijving in de oplegpunten elimineren door de oplegpunten te vervangen door draden, staven of sprieten, zie figuur 83
(Denkt men spriet CC_0 weggenomen dan kan men de constructie opvatten als een vierstangenmechanisme A_0ABB_0.
Het koppelpunt C roteert momentaan om de pool P'. De spriet CC_0 ontneemt dit mechanisme dus heel efficiënt elke bewegingsvrijheid; x, y en θ liggen eenduidig vast in een symmetrische constructie.)



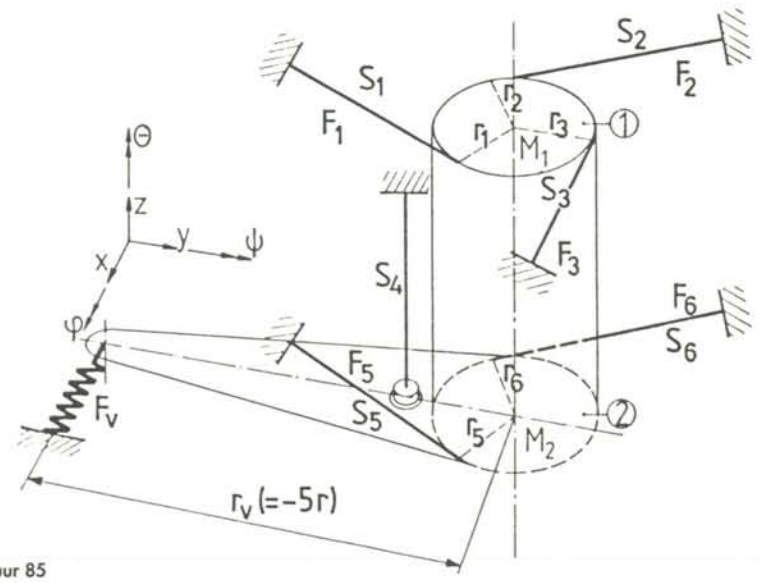
Figuur 83



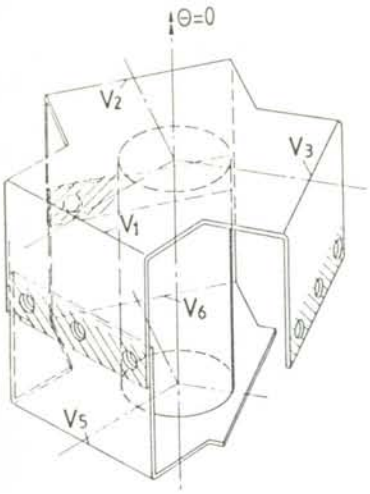
Figuur 84

De sprieten kunnen zelf weer warmte-uitzetting vertonen. Warmte-uitzettingsverschillen tussen de sprieten en de omgeving leiden tot (zeer geringe) rotatie θ bij behoud van de exacte x en y als de sprieten een gelijke uitzetting $\ell.\alpha.\Delta T$ hebben. Is de uitzetting van de sprieten onderling *niet* gelijk (bijvoorbeeld omdat de lengte niet gelijk kan zijn) dan kan men de straal r waarop de krachten F aangrijpen aanpassen, zodat
$\Delta\theta = (\ell.\alpha.\Delta T)_1/r_1 = (\ell.\alpha.\Delta T)_2/r_2$, enz.
Men neme bijvoorbeeld de straal r evenredig met de sprietlengte ℓ.

Hoe kunnen we nu in de ruimte een hartlijn op zijn plaats houden?
Een kruisveerscharnier bijvoorbeeld verplaatst zich bij uitzettingsverschillen "vanuit" TC, zie figuur 84.
Goede oplossingen zijn ook te vinden in analogie met figuur 81.
Werkt men met sprieten dan legt men in vlak 1, zie figuur 85, x_1, y_1 en θ vast geheel conform figuur 83 dus met drie sprieten S_1, S_2 en S_3.
Eén axiaal gerichte spriet S_4 legt z vast.
In vlak 2 legt men met twee sprieten S_5 en S_6 van een 2e punt M2 van de as de x_2 en y_2 vast.
De hartlijn ligt nu vast door de gedefinieerde punten M1 en M2, met andere woorden de kantelhoeken ϕ en ψ liggen vast.
Als de sprieten S_1, S_2 en S_3 weer onder 120° staan geldt $F_1 = F_2 = F_3 = F$.
Als de sprieten S_5 en S_6 bijvoorbeeld evenwijdig lopen met spriet S_1 respectievelijk S_2 en men brengt een voorspanveer (kracht F_v) aan evenwijdig met spriet S_3, dan geldt: $F_5 = F_6 = F_v$.
Voor het aangrijppunt r_v van de veer geldt dan (momentevenwicht):
$F(r_1+r_2+r_3) + F_v(r_5+r_6+r_v) = 0$.
Stel dat de stralen r_1 t/m r_6 gelijk aan r zijn, dan geldt: $F = F_v$ als $r_v = -5\,r$.



Figuur 85



Figuur 86

Bij homogene uitzettingsverschillen tussen de sprieten en de omgeving (bijvoorbeeld stalen sprieten in een aluminium huis) blijft nu toch de hartlijn exact op zijn plaats. Wel roteert het centrale lichaam iets om die hartlijn.
Zijn de sprietlengtes ongelijk dan kan men dat weer compenseren met de grootte van de straal conform
$\Delta\theta = (\ell.\alpha.\Delta T)_1/r_1 = (\ell.\alpha.\Delta T)_2/r_2$ enz.
(dus in het algemeen: r evenredig met ℓ).
Wordt in een apparaat of instrument warmte ontwikkeld (bijvoorbeeld lichtbronnen in optische apparatuur) dan kan er sprake zijn van een moeilijk voorspelbare, in tijd en plaats veranderlijke temperatuurverdeling, waaronder de positioneringsnauwkeurigheid lijdt. Het rondpompen van vloeistof of lucht kan tot homogenisering van het temperatuurveld bijdragen maar men moet zich wel realiseren dat de thermische tijdconstante van een dikke wand of een massief blok veel groter is dan van bijvoorbeeld een dunne plaat of spriet.
Zo kunnen dan ook bij gelijke uitzettingscoëfficiënt van huis en sprieten toch tijdelijke uitzettingsverschillen optreden, zodat de constructie van figuur 85 ook daar zin heeft.

Voor de translaties waarbij een geringe rotatie niet storend is (bijvoorbeeld bij cylindrische spoelen, axiaal bewegend in een radiaal magneetveld zoals in luidsprekers) blijkt figuur 85 een voortreffelijke oplossing te geven: bij weglaten van S_4 komt de z-coördinaat vrij.
Kleine verplaatsingen z geven een schijnbare verkorting van de sprieten $\Delta\ell = 0{,}6\, z^2/\ell$.
Daarmee geven de sprieten S_1, S_2 en S_3 een gedwongen rotatie $\Delta\theta = \Delta\ell/r$ bij behoud van x_1 en y_1.
Deze rotatie geeft bij de inklemming van de sprieten S_5 en S_6 juist de goede compensatie voor hun schijnbare verkorting $\Delta\ell$, zodat ook in het vlak 2 van S_5 en S_6 de coordinaten x_2 en y_2 van M_2 gehandhaafd blijven.
Voorwaarde is wel dat de sprieten even lang zijn en dat bij één waarde van z (bijvoorbeeld $z = 0$) alle sprieten *tegelijk* de as *loodrecht* kruisen en wel op *gelijke* afstanden r.
Als we de sprieten vervangen door "vouwlijnen in dunne plaat" komen we op figuur 86: statisch bepaald, spanningsvrij, thermisch stabiel, stijf en hysteresisvrij wanneer althans de in figuur 85 door arcering aangegeven bevestiging "aan de wereld" correct is gerealiseerd.
De nummering van de vouwlijnen V komt overeen met de nummering van de sprieten S in figuur 85.
Ten opzichte van deze uitvoering met sprieten heeft de constructie in plaat volgens figuur 85 het grote voordeel dat hij absoluut rotatievrij is en bovendien radiaal en tangentiaal véél stijver!
De ervaring leert dat het kritisch doordenken van constructies als deze ("Waarom is hij kantelstijf?) leidt tot en voorwaarde is voor het denken in – en kunnen construeren met – plaat.

"Constructies voor het nauwkeurig bewegen en positioneren" is een selectie uit de verzameling constructieprincipes die op initiatief van Prof. ir. W. v.d. Hoek in 1962 is opgezet en die nog steeds wordt uitgebreid. Door Ir. P.C.J.N. Rosielle en E.A.G. Reker (TU-Eindhoven) is speciaal voor de lezers van *Mikroniek* een selectie gemaakt die in 18 afleveringen wordt gepresenteerd.
Bijdragen van lezers als kritiek, suggesties of eigen ervaring worden door de auteurs op prijs gesteld.

Actueel

Zoeken in technische tijdschriftenbestanden geautomatiseerd via CD-ROM

Voor bezoekers van de technische bibliotheek van de TU Delft bestaat nu de mogelijkheid om via CD-ROM in samenvattingen van wetenschappelijke literatuur te zoeken. Bibliografische informatie als samenvattingen van wetenschappelijke literatuur is al op een aantal losse CD-ROM beschikbaar. Met de nieuwe installatie kan een gebruiker nu via één terminal en één menu in alle 15 CD-ROM bestanden van de Bibliotheek zoeken. Medewerkers van de bibliotheek zijn erin geslaagd om de vaak zeer verschillende zoeksoftware te combineren in één systeem. Daarmee is een grote hoeveelheid recente informatie in Nederland voor technisch-wetenschappelijk literatuuronderzoek op een bijzonder gebruikvriendelijke manier ter beschikking gekomen van onderzoekers en studenten. De Bibliotheek van de TU Delft heeft abonnementen op deze 15 bestanden, waardoor de informatie regelmatig – dat wil zeggen eens in de drie maanden – wordt ververst. Voor gebruikers die recentere informatie wensen bestaat ook de mogelijkheden om direct in externe databanken over de hele wereld te zoeken (on-line search). De Bibliotheek heeft toegang tot circa 1000 bestanden. On-line zoeken is echter kostbaar; bezoekers van de Bibliotheek kunnen nu gratis over de informatie via de CD-ROM beschikken, net als vroeger toen men de inhoudsregisters van de tijdschriften kon doorzoeken.
Op verschillende plaatsen in de Bibliotheek staan terminals; in de CD-ROM toren zelf kan door vele personen tegelijk (zelfs binnen hetzelfde bestand) worden gezocht.
Het lijkt erop dat wetenschappelijke samenvattingen steeds meer via CD-ROM beschikbaar gaan komen. Grote zalen vullende tijdschriftbestanden, waarin een gebruiker dagenlang moet zoeken, behoren dan tot het verleden.

Verbetering van de bewerkingsnauwkeurigheid bij ultraprecisie-verspanen

J. Franse

Een systeembenadering voor precisiebewerken wordt geïntroduceerd.
Het gebruik van de error budget techniek om de nauwkeurigheidsgrenzen te bepalen die worden opgelegd door de bewerkingsmachine en het materiaalverwijderingsproces wordt behandeld.
Strategieën voor foutenreductie ter verbetering van de werkstuknauwkeurigheid worden besproken.
Voorbeelden van precisiebewerkingstoepassingen in de gebieden van optische en magnetische recording worden behandeld.
Aangegeven worden de perspectieven voor de precisiebewerkingstechnologie in de nabije toekomst.

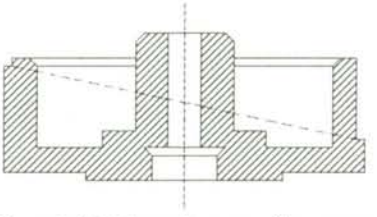
Improved part accuracy in ultraprecision machining

A systems approach to precision machining is introduced. The use of the error-budget technique to assess the limits of accuracy imposed by the machine tool and the material removal process is outlined. Error reduction strategies to improve part accuracy are discussed. Examples of precision machining applications in the fields of optical and magnetic recording are given. The perspectives for precision machining technology in the near future are indicated.

Ultraprecisie, een rekbaar begrip

De term ultraprecisie wordt algemeen gehanteerd voor onderdelen waaraan maat-, complexe-vorm- en ruwheidseisen worden gesteld die met de hedendaagse stand van de techniek ternauwernood gerealiseerd kunnen worden. De term complexe vorm wordt eigenlijk alleen gebruikt voor onderdelen met een zodanige vorm dat er geen simpele vervaardigingsmethode is die van nature zo'n vorm oplevert. Dit sluit bijvoorbeeld het vlakpolijsten uit omdat hierbij weliswaar zeer nauwe toleranties aan ruwheid en vlakheid van het produkt gesteld worden, maar het polijstproces zodanig is uit te voeren dat geen buitensporige inspanning nodig is. Voorbeelden van ultraprecieze produkten zijn te vinden in onder andere optische en magnetische recordingsystemen.
Voor de fabricage van relatief grote series video-scanners, zie figuur 1, door middel van diamantdraaien is momenteel een contournauwkeurigheid van 1 µm op de lineaal die de band moet geleiden ultraprecies, mede gezien de eisen ten aanzien van de geringe cyclustijd (typisch 60 s) welke gerealiseerd moet worden.
Bij de vervaardiging van matrijzen waarin asferische lenzen voor Compact Disc en andere optische recordingsystemen worden gerepliceerd, wordt een contournauwkeurigheid van 50 nm gevraagd. In de nabije toekomst zal de gevraagde nauwkeurigheid hoger worden gezien de voortschrijdende miniaturisering en doordat de informatiedichtheid zowel voor optische als magnetische recordingsystemen verder toe zal nemen. Voor magnetische recording is de invoering van High Definition Television een voorbeeld. Bij optische recordingsystemen zal naar verwachting sprake zijn van verdere miniaturisering, complexere geometrieën van optische componenten door integratie van functies en van hogere informatiedichtheid door het gebruik van lasers met een kortere golflengte dan de 785 nm van de huidige vaste-stof laserdioden.

Wat vandaag ultraprecies is hangt dus samen met de grootte van het gevraagde onderdeel, de complexiteit van de gevraagde vorm, de beschikbare tijd om het te maken en de stand van de vervaardigingstechniek. Welhaast zeker is de ultraprecisie van vandaag de normale precisie van het volgende decennium.



Tolerantie op	S-VHS	Toekomst
Uitw. diameter	8 µm	1 µm
Lineaalhoek	4 µm	1 µm
Lineaalvorm	2 µm	1 µm
Boringdia.	2,5 µm	1 µm

Figuur 1. Ondertrommel van een video scanner, met erbij aangegeven de moeilijkste van de geëiste toleranties.

Processen voor het precies bewerken van complexe vormen

Een groot aantal bewerkingsprocessen wordt toegepast om complexe oppervlakken te vervaardigen in metaal, glas en keramiek [1]. De voornaamste hiervan zijn diamantdraaien, contourslijpen en polijsten. Belangrijkste verschil tussen deze bewerkingen is de parameter waarmee de materiaalafname wordt beheerst (opgelegde verplaatsing, of kracht in combinatie met verblijftijd).

Bij *diamantdraaien* worden de machinebewegingen en daarmee de beweging van de diamantbeitel opgelegd. De materiaalafname is mechanisch van aard en vindt direct plaats in het (kleine) contactgebied tussen beitel en werkstuk. De haalbare nauwkeurigheid is bepaald door die waarmee de beitelpunt gepositioneerd en bewogen kan worden. Elke (fout)beweging van de machine, elke onvolkomenheid in de beitelvorm wordt direct in het produkt afgebeeld. Het relatief kleine contactgebied tussen beitel en werkstuk maakt het mogelijk op een klein werkstukoppervlak grote verschillen in snedediepte te realiseren, waardoor complexere vormen zijn te maken.

Bij het *polijsten* is de belasting waarmee de polijstschijf tegen het werkstuk gedrukt wordt opgelegd, en deze is samen met de verblijftijd van de polijstschijf op een bepaald gedeelte van het werkstukoppervlak bepalend voor de materiaalafname. Door de relatieve beweging van de polijstschijf ten opzichte van het werkstuk treedt abrasieve slijtage op over het relatief grote contactgebied tussen lap en werkstuk, waardoor grote verschillen in afnamesnelheid op naastgelegen lokaties moeilijk zijn te realise-

ren. De materiaalafname is een combinatie van mechanische en chemische actie. Vormverandering van het werkstuk is een relatief langzaam, geleidelijk proces van middeling over de acties van vele korrels over lange tijd.
Dat betekent dat het polijstproces veel meer vergevingsgezind is dan diamantdraaien, in de zin dat kortstondige variaties in de procescondities niet direct desastreus hoeven te zijn. Aan polijstmachines hoeven dan ook veel minder hoge stijfheidseisen gesteld te worden dan aan diamantdraaibanken.

Precisieslijpen zit qua proceseigenschappen in vele opzichten in tussen diamantdraaien en polijsten. De machinebewegingen worden gestuurd, maar door de compliantie (de invering ten gevolge van krachten) van het gereedschap (en vaak ook de slijpspil) is de positie van de snijkant veel minder exact bepaald dan bij diamantdraaien [2]. Het is dan ook moeilijker met slijpen dezelfde vormnauwkeurigheid te realiseren als met draaien.
Slijpen is in vergelijking met polijsten een veel sneller proces, waarmee complexere vormen gerealiseerd kunnen worden. Ten opzichte van diamantdraaien heeft slijpen het voordeel dat ook zeer brosse materialen verspaand kunnen worden.
Bij gebruik van geringe snedediepten en kleine krachten blijken zelfs de meest brosse materialen op een ductiele manier verspaanbaar te zijn, met een oppervlaktekwaliteit die vergelijkbaar is met polijstkwaliteit [3, 4].

Systeembenadering van precisiebewerkingen

Hoewel de systeembenadering (figuur 2) algemeen toepasbaar is, wordt de methode hier geïllustreerd aan de hand van het meest toegepaste proces, het diamantdraaien.
Het totale bewerkingssysteem omvat twee subsystemen: de machine (inclusief zijn directe omgeving) en het proces, meer in het bijzonder de interactie tussen gereedschap en werkstuk. Deze beinvloeden elkaar en gezamenlijk bepalen ze de werkstukkwaliteit ten aanzien van maat, vorm, ruwheid en oppervlakte-integriteit (de integriteit is de invloed van bewerkingen op de fysische eigenschappen).

Machine-aspecten

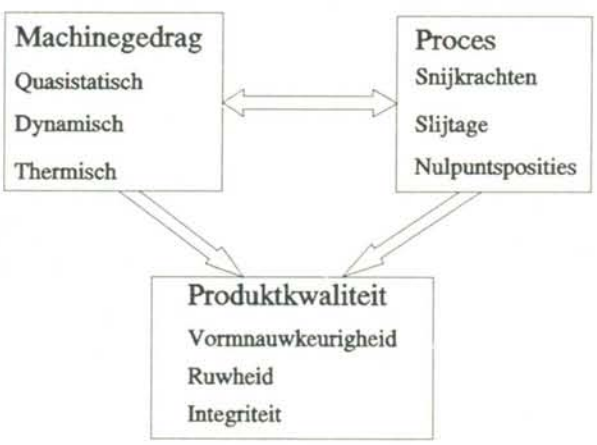
In het geval van diamantdraaien wordt een groot aantal karakteristieken van het machinegedrag vastgelegd in de ontwerp- en installatiefase. Breuning [5] gaf recentelijk een overzicht van de constructieve aspecten van diamantdraaibanken welke van invloed zijn op het machinegedrag en Franse [1] beschreef welke principes bij het ontwerp van precisie-bewerkingsmachines van belang zijn. Het gebruik van goede trillingsisolatie is essentieel om de invloed van vloertrillingen op de bereikbare oppervlaktekwaliteit te beperken. Nauwkeurige hydrostatische of luchtlagers en spelingvrije aandrijvingen worden gebruikt voor het bereiken van de nodige plaatsnauwkeurigheid en bovenal herhaalbaarheid van de sledebewegingen.

In de machinestructuur is een aantal informatiepaden (lussen) te onderkennen.
De *krachtlus* geeft aan hoe de proceskrachten door de machinestructuur geleid worden (en waar complianties optreden). Er wordt van het geregelde systeem een zo hoog mogelijke stijfheid gevraagd om compliantiefouten ten gevolge van beitelkrachten gering te houden.
Thermische lussen geven aan hoe onderdelen die door temperatuurvariaties uitzetten bijdragen tot produktfouten. Vaak vallen thermische en krachtlussen samen.
Meetlussen geven ten slotte aan hoe de posities van beitel en werkstuk ten opzichte van elkaar gemeten en geregeld worden.
De componenten in deze lussen bepalen de respons van de machine op inputs zoals gewenste versnellingen en bewegingen, en ongewenste verstoringen zoals snijkrachten en omgevingsinvloeden. Van groot belang is, naast het quasi-statische gedrag, het dynamische gedrag van de machine in relatie met zijn omgeving en de produktiecyclus.

Verschillende eisen, welke bij het vervaardigen van enkelstuks ultraprecieze matrijzen voor optische recording en in serie gedraaide magnetische-recordingscanners aan het machinegedrag worden gesteld, zullen verderop in dit artikel toegelicht worden.

Procesaspecten

Met procesaspecten worden die factoren bedoeld die door de uitvoering van de draaibewerking nog beïnvloed worden nadat de machine in zijn omgeving geïnstalleerd is. Voorbeelden zijn de keuze en voorbehandeling van het te bewerken produktmateriaal en de opspanning daarvan op de machine. Het te bewerken materiaal moet spanningsarm zijn en de opspanning en bewerkingscyclus mogen niet resulteren in ontoelaatbare vervormingen van het werkstuk. De keuze van de diamantbeitel is ook van groot belang. Monokristallijn diamant is anisotroop in hardheid. Dat resulteert er in dat tijdens het bewerken van de diamantbeitel niet een perfecte cirkel wordt gemaakt, dus de vorm van de diamant lokaal kleine afwijkingen van een zuivere cirkel zal vertonen. Bij het draaien van een contour verschuift het contactpunt tussen beitel en werkstuk langs de beitelrand. Bij dit afwikkelen van de snijkant van de diamant langs een contour resulteert de imperfecte vorm van de beitel dan in een produktfout. Ook de slijtagesnelheid van diamant is anisotroop en de manier van slijten (abrasie van de snijkant of kolkslijtage) hangt verder af van het materi-



Figuur 2. De systeembenadering van precisiebewerken.

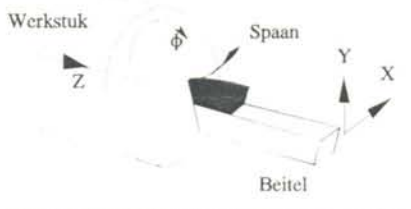
Verbetering van de bewerkingsnauwkeurigheid bij ultraprecisie-verspanen

aal dat bewerkt wordt (koper of aluminiumlegeringen, morfologie van het te bewerken materiaal, zoals de hoeveelheid harde insluitsels, en van de typen van structuurbestanddelen en hun verdeling).

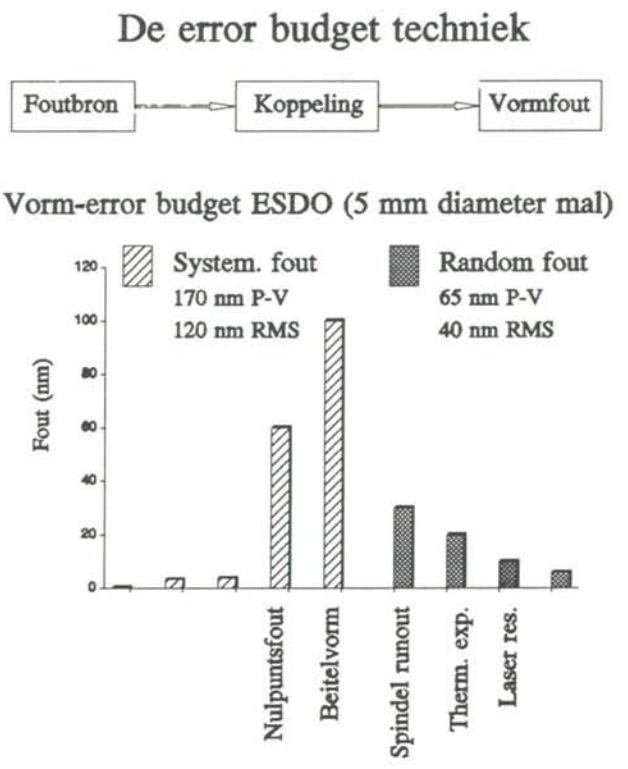
Een belangrijke foutenbijdrage is die ten gevolge van de onzekerheid in de absolute positie van de rotatieas van het werkstuk ten opzichte van de beitelpunt. De te snijden contour wordt opgegeven ten opzichte van dit nulpunt, dus een dergelijke zogenaamde nulpuntsfout zal in een produktfout resulteren.

De produktcyclus is ook van invloed op de procesfouten. Door terugkoppeling geregelde servosystemen waarvan een verplaatsing gevraagd wordt, gaan naar de nieuwe gevraagde positie op een manier die afhangt van de wijze waarop het setpoint-profiel (opzetprofiel) wordt aangeboden en van de dynamische karakteristieken van het systeem. Deze laatste zijn onder andere de servobandbreedte, welke een gevolg is van de bewegende massa, de geregelde stijfheden en de demping. In het algemeen treedt bij een gevraagde asbeweging een positie-volgfout op die evenredig is met de gevraagde snelheid, en zullen ook gevraagde snelheidsveranderingen van een as niet acuut gerealiseerd worden door de traagheid van de machine.
Bij het draaien van een contour is van belang dat de positie-volgfout van elk der bewogen assen klein is, maar bovenal dat het verschil in de snelheidsfouten van de simultaan bewegende assen binnen de perken blijft [6].

Om de limieten te begrijpen welke de machine en het proces aan de bewerkingsnauwkeurigheid stellen, en een strategie ter verbetering van de bewerkingsnauwkeurigheid te kunnen kiezen, is een nauwgezette analyse van de diverse foutenbijdragen vereist, waarbij zowel de statische als de dynamische respons van de machine onderzocht



Figuur 3. Diamantdraaien van een contour in een kops vlak.



Figuur 4. Staafdiagram van de belangrijkste foutenbijdragen uit het vorm-error budget van een diamantdraaibank (P-V is topdal).

dient te worden. Ook de invloed van procesfouten moet worden geanalyseerd. Dit leidt tot een "error budget" [7] van het systeem.
Deze techniek zal worden toegelicht aan de hand van het in figuur 3 geschetste probleem: het draaien van een zeer nauwkeurige contour in een kops vlak zoals voorkomt bij de vervaardiging van matrijzen voor de fabricage van asferische CD-objectieflenzen.

Error budgettering

Als eerste stap op weg naar een error budget wordt een inventarisatie van mogelijke foutenbronnen gemaakt. Dit resulteert voor het voorbeeldprobleem in een lijst van ongeveer tachtig fouten welke zouden kunnen optreden.
Voorbeelden van foutenbronnen zijn de geometrische fouten in de componenten van de sleden en variaties van de omgevingstemperatuur of druk. Naast dit soort foutenbronnen, die geassocieerd zijn met de machine en de omgeving, komen ook foutenbronnen voor die te maken hebben met het proces. Voorbeelden zijn de snijkrachten, de offsetfouten (verschuivingsfouten) bij het positioneren van de beitel ten opzichte van de rotatieas van de hoofdspil (nulpuntsfout) en de onnauwkeurigheid in de geometrie van de diamantbeitel.
Een foutenbron resulteert in een produktfout via een zogenaamd koppelend mechanisme; zie figuur 4. Voorbeelden van koppelende mechanismen zijn afstanden in de machinestructuur die als arm fungeren waarmee een geometrische foutbeweging van de slede wordt versterkt (Abbe-offset), of de thermische massa van de machinestructuur die leidt tot een geleidelijke, trage respons van de machinestructuur op een plotselinge verandering van de omgevingstemperatuur.
De foutenbijdragen worden uitgesplitst naar tijdschaal. "Snelle fouten" (zoals hoogfrequente machinetrillingen) zullen resulteren in ruwheid van het bewerkte oppervlak, "langzame fouten" (thermische uitzettingen) kunnen een bijdrage leveren aan vormfouten van het produkt, mits een verstoring binnen de produktie-cyclustijd tot een significante respons leidt.
Naast de grootte is ook de richting van de optredende fout van belang, aangezien voor een bepaald produkt niet alle richtingen even kritisch zijn. In het voorbeeld (figuur 3) is de Z-richting essentieel, alles wat in die richting fout gaat is direct produktfout. De X-richting is alleen kritisch voor diepe produkten. Foutenbewegingen in de Y-richting zijn

veel minder kritisch.
Het voorbeeldprobleem is contournauwkeurigheid, daarvoor zijn dus die fouten van belang die tot vormfouten bijdragen.

Door metingen en berekeningen worden afschattingen gemaakt van de ernst van de foutenbijdragen, waarbij ook het effect van meetlussen in de machinestructuur moet worden meegenomen. De grootte van het produkt en de snijcyclus bepalen de benodigde slag van de sledebeweging en de bewerkingstijd, en beïnvloeden dus de foutenbijdragen ten gevolge van geometrische onnauwkeurigheden en thermische effecten. Het te bewerken materiaal, de gekozen snedediepte en aanzet zijn ook van invloed op de snijkrachten en daarmee op de optredende compliantiefouten. Vandaar dat deze aspecten in de beschouwing betrokken moeten worden.
Deze procedure reduceert de initiële lijst van foutenbronnen tot een veel beperkter aantal wezenlijke foutenbijdragen.
In figuur 4 zijn deze voor een op het Philips Natuurkundig Laboratorium gebouwde Experimentele Draai en Slijp Opstelling (ESDO) in de vorm van een staafdiagram weergegeven voor het voorbeeldprobleem.
Het error budget toont welke foutenbijdragen de nauwkeurigheid beperken. Daarnaast kan het gebruikt worden voor een voorspelling van de nauwkeurigheid die met een machine en proces gehaald kan worden. Daartoe is het nodig aan te geven hoe de diverse fouten elkaar zullen versterken of verzwakken. Dit is het meest onzekere stuk van de theorie.
Een pessimist rekent erop dat alle fouten wel eens gelijk op kunnen treden (worst-case), de optimist neemt een RMS (kwadratisch gemiddelde) waarde. Een niet wetenschappelijke, maar praktisch werkende simpele regel is het gemiddelde van deze twee getallen te nemen.
De fouten in het error budget kunnen worden onderscheiden in reproduceerbare en toevallige fouten. Dit is van groot belang voor de foutreductiestrategie die toepasbaar is om de nauwkeurigheid van het bewerkingssysteem desgewenst te verhogen.

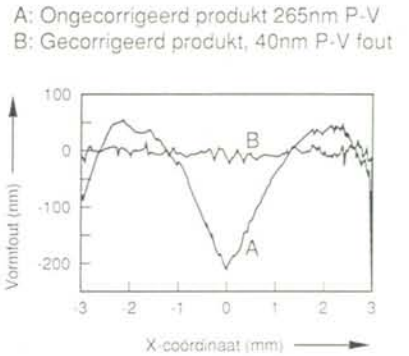
Strategieën voor verbetering van de bewerkingsnauwkeurigheid

Om de nauwkeurigheid te verhogen kunnen verschillende foutreductiemethoden worden toegepast.

- Vermindering of eliminatie van de bronsterkte (temperatuurbeheersing van de omgeving is een voorbeeld).
- Off-line kalibratie en compensatie met de CNC (herhaalbare geometrische foutenbewegingen van sleden opslaan in tabellen).
- Minimalisering van het effect van een bron door verandering in het koppelend mechanisme (Abbe-offset verkleinen, niet-uitzettend materiaal gebruiken).
- In-proces bepaling en voorwaartscompensatie (kantelfouten van de rotatiebeweging door meting aan weerszijden van het produkt, en compensatie voor het effect hiervan op de positie van het gereedschap).
- Introductie van iteratieve correcties voor systematische fouten in het systeem.
  Dit is alleen toepasbaar voor herhaalbare fouten en de machine moet stabiel zijn gedurende de tijd nodig om een iteratie uit te voeren. Deze techniek zal aan de hand van het voorbeeldprobleem nader worden toegelicht.
- Voorwaartscompensatie van ongewenste effecten door schatting van modelparameters uit meting van het produkt tijdens het bewerkingsproces.
  Ook hiervan zal een voorbeeld worden besproken betreffende het precisieslijpen van matrijzen voor optische recording.

De eerste vier van de bovengenoemde methoden worden eventueel geïmplementeerd in de ontwerp- en de constructiefase van de machine. De laatste twee technieken worden veelal toegepast op bestaande machines om reproduceerbare machine-gerelateerde foutenbijdragen te reduceren zonder constructieve ingrepen. Ook voor reproduceerbare procesfouten als gevolg van gereedschapsgeometrie en nulpuntsfouten kan met deze technieken worden gecorrigeerd.

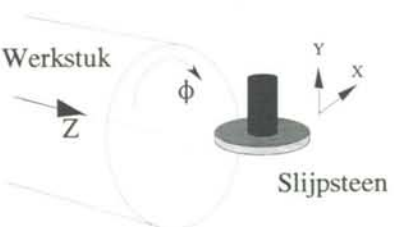
Zolang fouten herhaalbaar zijn en de machine stabiel blijft, is zeker dat tijdens de eerstvolgende iteratieslag dezelfde foutenbewegingen weer zullen optreden. Als voor deze systematische fouten wordt gecorrigeerd door de voorgeschreven baan van de machinesleden aan te passen, wordt tijdens zo'n iteratieslag een beter produkt gerealiseerd.



Figuur 5. Profielfout van gedraaide matrijzen: A) na eerste bewerkingsgang, B) na tweede bewerkingsgang, met correctie voor systematische fouten.

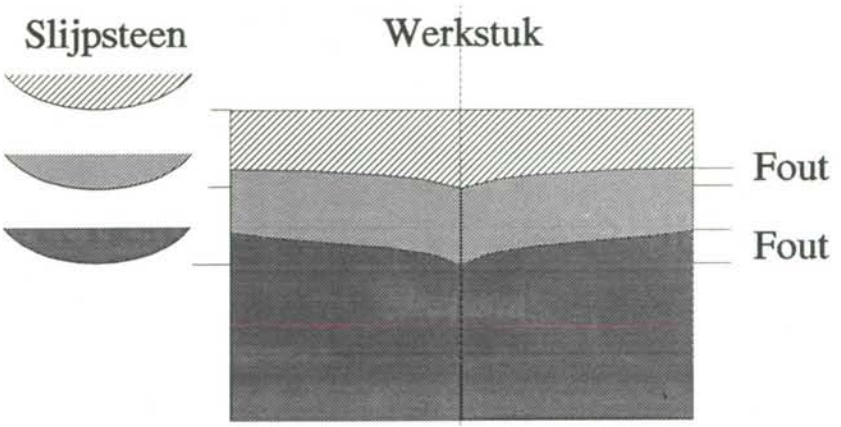
Figuur 5 toont een voorbeeld van de effectiviteit van deze werkwijze. In de eerste bewerkingsgang wordt een produkt gedraaid waarbij de X-positie van de rotatie-as ten opzichte van de punt van de beitel 1 µm verkeerd is ingeschat. De figuur geeft de fout aan ten opzichte van het gewenste contour, en de P-V (top-dal) waarde van het gedraaide error profiel is 265 nm. Na een enkele meet- en correctieslag is dit gereduceerd tot 40 nm P-V. Deze 40 nm komt goed overeen met de RMS waarde van de som van de random fouten in het vorm-error budget van de machine (figuur 4).

Essentieel bij toepassing van een dergelijke werkwijze is dat de produktmetingen zo snel uitgevoerd worden dat de draaibank stabiel blijft over de meettijd en de berekende correctie dus nog relevant is. Dit lukt door toepassing van mechanische en optische meetmethoden direct op de draaibank. Binnen enkele minuten wordt het produkt gemeten en de correctieslag uitgevoerd. Naast hoge nauwkeurigheid geeft dit ook een relatief korte cyclustijd, hetgeen ook gunstig is voor de kostprijs van dit soort mallen.
Precisieslijpen, zie figuur 6, is nog wat moeilijker dan diamantdraaien. De



Figuur 6. Bewegingen bij het precisieslijpen

Verbetering van de bewerkingsnauwkeurigheid bij ultraprecisie-verspanen



Figuur 7. De profielfout bij het precisieslijpen neemt toe in achtereenvolgende bewerkingsstappen (tot een stationaire situatie bereikt wordt).

complicerende factor is de vrij geringe stijfheid van de slijpspil en slijpsteen. Terwijl we in de X-richting langs het werkstuk bewegen, waarbij de rotatiesnelheid van de spil (ω) constant gehouden wordt, varieert de snijsnelheid ($v_{snij}=\omega X$), en daarmee ook het verspaande volume per tijdseenheid. Dit resulteert in variërende slijpkrachten en dus een variërende uitbuiging van de combinatie slijpsteen/spil. Verder is het zo dat een slijpbewerking vele bewerkingsstappen omvat. De profielfout die als gevolg van de spil/slijpsteen compliantie in voorgaande stappen is gemaakt, heeft ook invloed op het resultaat in volgende stappen, zie figuur 7. In achtereenvolgende slijpgangen neemt de profielfout toe doordat in elke stap als gevolg van de spilcompliantie materiaal achtergelaten wordt, wat in volgende stappen de schijnbare snedediepte en daarmee de snijkrachten vergroot, totdat uiteindelijk een stationaire toestand wordt bereikt.

In figuur 7 is te zien hoe door de opeenstapeling van compliantie-effecten in achtereenvolgende slijpgangen de profielfout toeneemt, als de machine in elke slijpgang gelijke stappen in de Z-richting maakt.

Er kan een mechanisch model worden opgesteld om deze effecten te modelleren [2]. Uit meting van geslepen profielen worden de parameters van het model bepaald. Vervolgens kan dan met het model bepaald worden hoe op een bepaald moment in een volgende slijpgang op de compliantie-effecten geanticipeerd moet worden om toch het gewenste profiel te slijpen.

Figuur 8 toont experimentele resultaten welke met deze werkwijze zijn verkregen. Het eerste profiel is gemeten na een aantal slijpgangen waarvan vervolgens de modelparameters zijn berekend. Daarna wordt een voorwaartscompensatie berekend en is in de volgende slijpgang een veel beter profiel gerealiseerd.

Deze methode is momenteel nog slechts geïmplementeerd voor eenvoudige proefstukken en nog niet uitgewerkt voor complexe vormen als asferen waarbij naast compliantiefouten ook nulpuntsfouten en radiusfouten van de slijpsteen moeten worden gecompenseerd.

Diamantdraaien van enkelstuks produkten versus serieproduktie

Bij enkelstuksproduktie van matrijzen voor optische recording wordt submicron vormnauwkeurigheid verlangd. Aangezien de kostprijs van een matrijs over vele produkten omgeslagen wordt, is de produktietijd minder kritisch dan bij seriefabricage van onderdelen die direct totaal tot de kostprijs van het eindprodukt bijdragen.

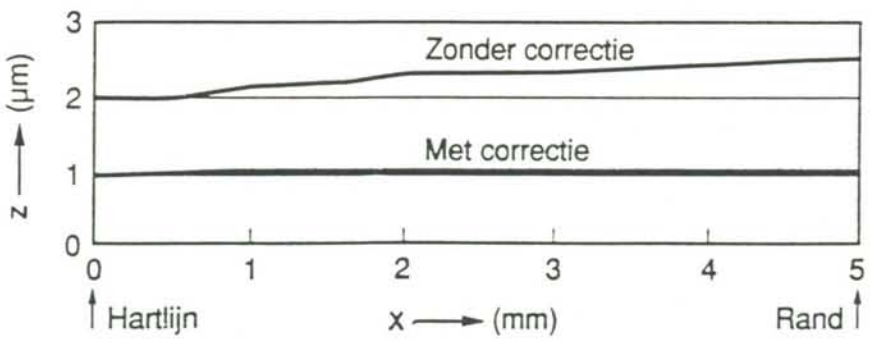
Vandaar dat aan een ultraprecisiedraaibank minder zware eisen gesteld worden op het gebied van te bereiken bewerkingsnelheden en maximale versnellingen. De aandrijvingen van seriemachines zijn dus typisch zwaarder en duurzamer dan van precisiemachines en de filosofie ten aanzien van de warmtehuishouding van de machine is vaak ook noodzakelijkerwijze anders. De hogere snelheden bij de seriefabricage leiden ook tot zwaardere eisen voor het dynamisch gedrag van de machine.

Het toepassen van iteratieve correcties wordt om economische redenen zoveel mogelijk vermeden bij serieproduktie. Om deze wel goed toe te kunnen passen bij de matrijsfabricage worden daar veel hogere eisen gesteld aan de conditionering van de machineomgeving omdat de machine over een lange cyclustijd stabiel moet worden gehouden. Fundamenteel verschillend is ook de manier van meten. Bij matrijsfabricage wordt elk produkt gemeten, liefst op de bewerkingsmachine. Voor seriefabricage wordt momenteel nog off-line steekproefsgewijze gemeten.

In beide gevallen is met de vooruitgang in bewerkingsnauwkeurigheid het voorhanden zijn van geëigende meetmiddelen vaak een probleem dat evenveel aandacht behoeft als de bewerkingstechnologie.

De enkelstuksfabricage wordt gekenmerkt door een hoge mate van flexibiliteit ten aanzien van de produktgeometrie. In het algemeen wordt voor elk produkt een aparte opspanning gemaakt om een juiste oriëntatie en uitlijning met de draaiingsas van de machine te bereiken. Bij serieproduktie worden veel zwaardere eisen gesteld aan de nauwkeurigheid, (ongevoeligheid voor) vervuiling en levensduur van spanmiddelen.

Bij de enkelstuksfabricage is tenslotte een goede, ervaren operator noodzakelijk, volledig vertrouwd met een bepaal-



Figuur 8. Profielfout bij het precisieslijpen. Na vijf slijpgangen zonder correctie, en nadat in de zesde slijpgang de berekende voorwaartscorrectie voor compliantie-effecten was toegepast.

de machine en daardoor in staat een stuk meer uit een machine te halen dan er enkel analytisch gezien in zit. Bij massafabricage met meerploegenproduktie is het omgekeerde het geval. Daar moeten de machine en het proces zo robuust zijn dat acties van operators eenvoudig zijn, en slechts zeer beperkt nodig. De metingen en meetmiddelen moeten zo goed zijn dat geconstateerde afwijkingen direct (zonder vertraagde respons) te verhelpen zijn door een enkele parameter bij te regelen.

Toekomstige ontwikkelingen

In de ultraprecisie-verspaning van matrijzen voor optische recording is een trend waarneembaar in de richting van het vervaardigen van niet-rotatiesymmetrische optiek. Dit houdt in dat snelle actuatoren, die tot hoge bandbreedte geregeld kunnen worden, ontwikkeld moeten worden.
In de seriefabricage van precieze onderdelen van consumentenelektronica zal in de nabije toekomst een verdergaande integratie van maken en meten plaats gaan vinden. Te verwachten is dat de uitkomsten van produktmetingen volautomatisch teruggekoppeld gaan worden naar de machinebesturing.
Met de verdergaande verkorting van cyclustijden zal de machinedynamica een steeds belangrijker beperking worden.
Te verwachten is dat meet- en regelconcepten als adaptive control en mogelijk fuzzy logic deze problematiek kunnen helpen oplossen. Procesregeling vindt dan mede plaats door aanpassing van de servokarakteristieken van de machine op grond van produktmetingen.
In elk geval zal een verdergaande ontwikkeling van snelle contactloze meetmethoden nodig zijn om te zorgen dat de precisie die bereikt wordt ook gemeten kan worden. Het gebruik van optische meettechnieken zal daardoor toenemen.
De trend naar miniaturisatie maakt dat de hogere precisie die gevraagd wordt, gemaakt en gemeten moet worden met steeds kleinere gereedschappen in steeds kleinere, dunwandiger onderdelen waarin meer en meer functies worden geïntegreerd, waardoor steeds complexere vormen nodig zijn. Speciale spantechnieken en meettechnieken en complexere data-verwerkingsalgorithmen zullen nodig zijn om dit soort "aardappelschil"-produkten, die steeds minder referentie- en spanvlakken zullen hebben, te maken en te meten.

Literatuur

[1] Franse J., Manufacturing Techniques for Complex Shapes; Rep. Progr. Physics, Vol. 53 (1990) 8, pp. 1049-1094.
[2] Franse J., Aspects of Precision; PhD Thesis (1991), Techn. Un. Eindhoven/Philips Res. Labs Eindhoven.
[3] Bifano T.G., Dow T.A. and Scattergood R.O.; Proc. Int. Congr. Ultra-Precision Techn. (Aachen), (1988) pp. 20-40, Berlin, Springer.
[4] Bifano T.G., Ductile Regime Grinding of Brittle Materials; PhD Thesis (1988), North Carolina State Un., Raleigh, N.C.
[5] Breuning M., Machines voor ultra-precisie bewerking; Mikroniek, 31(1991)1, pp. 17-24.
Koren Y., Control of Machine Tools and Robots; Appl. Mech. Rev., Vol. 39 (1986) 9, pp. 1331-1338.
[7] Donaldson R.R., Error Budgets; Rep. Machine Tool Task Force, Vol. 5 (1980) UCRL-52960-5.

De auteur Dr. ir. J. Franse was werkzaam bij het Philips Natuurkundig Laboratorium te Waalre en momenteel bij het Centre for Technology (CFT) te Eindhoven.

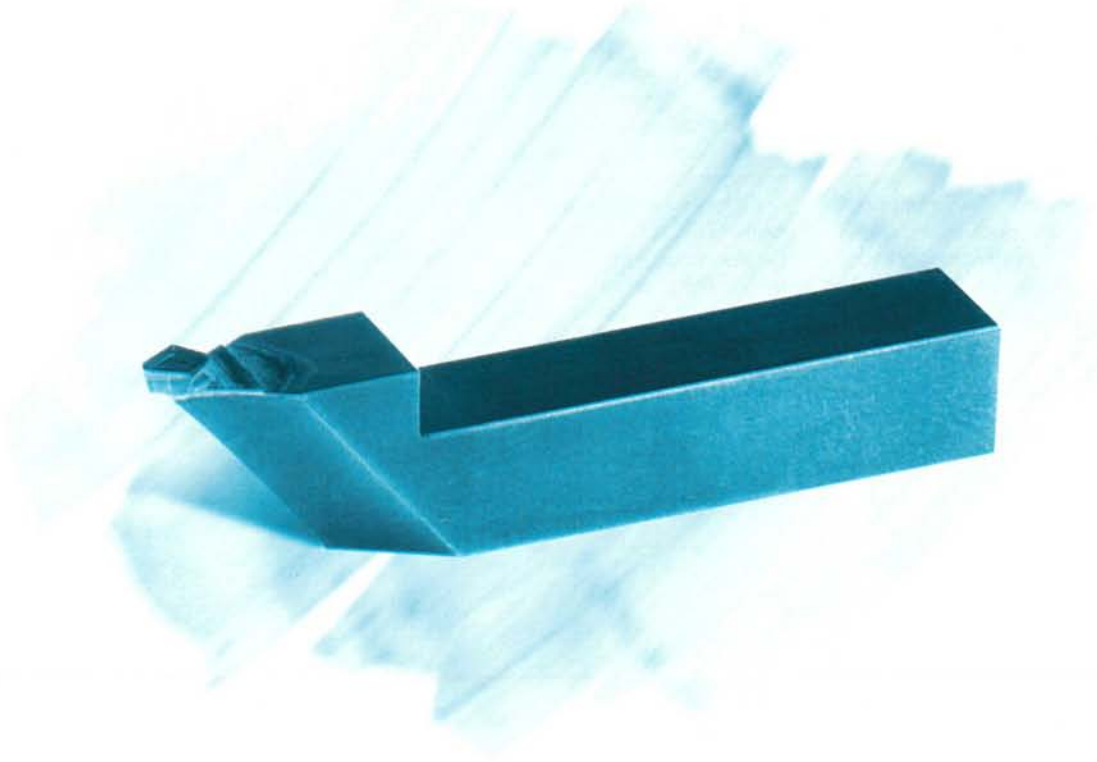
Actueel

Leerstoel milieukundig ontwerpen aan de TU Delft.

Milieubewust, of liever: milieukundig ontwerpen van industrieel te vervaardigen gebruiksgoederen voor consumenten- en professionele markten, is iets dat nog niet of nauwelijks gebeurt. Vandaar dat de faculteit Industrieel Ontwerpen van de TU Delft het initiatief heeft genomen voor het oprichten van een sectie Milieukunde. Een deeltijdhoogleraar zal zich, samen met een universitair docent en een aantal promovendi, gaan bezighouden met het opzetten van onderwijs en onderzoek gericht op het 'milieukundig ontwerpen'.
De ideeën en technieken die nodig zijn voor milieukundig ontwerpen moeten echter voor het overgrote deel nog worden ontwikkeld. Allereerst zal daarom de nadruk komen te liggen op het verzamelen van data voor een 'milieukundig verantwoord produktiebeleid'; het inventariseren en modelleren van milieu-implicaties van een groot aantal in massa vervaardigde gebruiksgoederen; het ontwikkelen van informatiemethoden voor produktgebruikers, en voor het ontwerpen van speciale gebruiksgoederen en systemen rond hergebruik. Is die kennis eenmaal verzameld en geordend dan moet ze worden doorgegeven aan studenten, ontwerpers en constructeurs, beroepsorganisaties en de industriële en consumentenorganisaties.

Industrieel ontwerpen neemt een belangrijke plaats in de materiaalstroom. De industrieel ontwerper bepaalt de aard van het nieuwe (massa- of serie)produkt; maakt een keuze uit materialen, halffabrikaten en onderdelen; beïnvloedt de produktiewijze in hoge mate, evenals het energieverbruik en het ontstaan van afval en emissies tijdens de produktie; ontwerpt bovendien (gedeeltelijk) de gebruikswijze die ook weer samenhangt met materiaal- en energieverbruik bij grote groepen gebruikers; ontwerpt (eveneens gedeeltelijk) ook de levensduur en het onderhoud en heeft invloed op een vervolggebruik van het produkt in zijn geheel, of in onderdelen, en op de terugstroom, de scheidbaarheid en het hergebruik van de materialen. Met andere woorden, eenmaal ontworpen draagt het produkt zijn eigenschappen en aanspraken op materialen, energie en belasting van het milieu, de hele 'product life cycle' met zich mee. De invloed van de industriële ontwerper en zijn/haar verantwoordelijkheid voor het milieu, is dus zeer groot. Temeer daar minister Alders (Milieubeheer) producenten verantwoordelijk stelt voor hun produkten in alle fasen van de levenscyclus, ook wel integraal ketenbeheer genoemd. Gebrek aan kennis over milieuzaken, zowel in het voortraject bij de vervaardiging van grondstoffen als tijdens de vervaardiging van het produkt en tijdens het gebruik en in de afvalfase, speelt een negatieve rol tijdens het ontwerpproces.

We're always working at the edge...



ULTRA-PRECISION CUTTING TOOLS

Professional Diamond Tools, formerly part of Philips, is a dependable supplier of ultra-precision diamond cutting tools to optical and electronics industries throughout the world. *PDT* also supplies diamond wire guides to the machine-tool industry and diamond drawing dies to cable and wire manufacturers. Its products are available in standard ranges (or can be custom-designed) and are manufactured to the highest standards of precision, quality and reliability.

Complete details are available on request. Let us show what we can do.

PROFESSIONAL DIAMOND TOOLS (PDT)

Geenhovensedreef 22, 5552 BD Valkenswaard. The Netherlands.
Telephone: +31 4902 823211. Telefax: +31 4902 44715. Telex: 51579 pdt nl.

De röntgenastronomie-satelliet ROSAT

Dieter Reinhardt

Astronomen en astrofysici hebben voor het ontraadselen van de geheimen van het heelal totaal nieuwe waarnemingsmethoden tot hun beschikking gekregen, nu het mogelijk is om met raketten de aardatmosfeer te verlaten die ons beschermt, maar die evenzeer ons zoeken naar kennis belemmert. Reeds lang werd aangenomen dat sterren straling uitzenden in het gehele elektromagnetisch spectrum, maar dat op het aardoppervlak slechts een gering deel hiervan met de klassieke telescopen wordt waargenomen. In 1948 gelukte het amerikaanse fysici met behulp van V2-raketten uitgerust met Geigertellers voor het eerst om röntgenstraling van de zon te detecteren. Sindsdien worden ruimtevaarttechnieken voor dit doel gebruikt en reeds in 1962 werd de eerste röntgenster ontdekt, zie tabel 1. Bij de ontwikkeling van geschikte voertuigen – van stratosfeerballons tot ballistische raketten, satellieten en uiteindelijk bemande ruimtevaartuigen – en technieken voor hun besturing en voor dataoverdracht, was de röntgenastronomie slechts de gebruiker.

Binnen deze tak van de astronomie is een tweetal eigen ontwikkelingen noodzakelijk geweest voor de voortgang van het onderzoek. Enerzijds moesten speciale detectoren worden ontworpen voor het meten van straling over een breed golflengtegebied. De eisen wat betreft gevoeligheid en scheidend vermogen werden hierbij in de loop van de tijd steeds strenger. Anderzijds waren systemen nodig, niet allen om een voldoende hoeveelheid straling te kunnen opvangen, maar ook om, zoals bij optische telescopen, de intensiteitsverdeling zo goed mogelijk in een vlak af te beelden.
Aan de universiteit van Tübingen hield een groep wetenschappers zich intensief bezig met de problemen van de röntgenastronomie. Aanvankelijk deden zij scintilatieteller-experimenten met behulp van stratosfeerballons. De leider van deze groep, Prof. Dr. Trümper, werd in 1976 benoemd tot directeur van het Max Planck-instituut voor Ruimtefysica (MPE) in Garching. Daar werd de reeds in 1974 in Tübingen begonnen samenwerking met de firma Zeiss op het gebied van röntgenoptica voortgezet. Reeds in 1976 leverde Zeiss de eerste parabolische aluminium-spiegels met een diameter van 15 cm. Via

Figuur 1. Een 15-cm parabolische spiegel uit de eerste serie röntgenspiegels van Zeiss (1976).

een nikkel-tussenlaag was hierop een röntgen-reflecterende goudlaag aangebracht. Deze spiegels speelden een grote rol in het ASTRO-8 experiment dat op 26 januari 1977 vanaf de Amerikaanse lanceerbasis White Sands in New Mexico werd gelanceerd met een Aries ruimteraket, figuur 1.
In dezelfde tijd bouwde men in de VS een afbeeldende röntgentelescoop, een zogenaamde Wolter-telescoop, ten behoeve van de later als Einstein-observatorium bekend geworden HEAO-B satelliet die twee jaar later in een baan om de aarde werd gebracht. Dit was voor Trümper aanleiding om samen met Zeiss aan de ontwikkeling van grotere afbeeldende röntgentelescopen te beginnen. Na een drietal 30-cm Wolter-telescopen voor raket-experimenten, leidde dit tot het spiegelsysteem voor de Duitse röntgensatelliet ROSAT, op dit moment de grootste en krachtigste röntgentelescoop ter wereld. ROSAT draait sinds 1 januari 1990 in een baan om de aarde en heeft tot nu toe aan alle verwachtingen der wetenschappers voldaan. Dit was het resultaat van tien jaar intensief werken door een groep optici, fysici en ingenieurs bij Zeiss in Oberkochen.

Zeiss ontving in de herfst van 1977 van het MPE de eerste opdracht voor het ontwerpen van een 80-cm Wolter-telescoop. In verband met de verwachte omvang van het project leek het de wetenschappers raadzaam de projectleiding daar te leggen waar men er, ook qua personeel, het beste voor was opgesteld. Eind 1979 kreeg Zeiss dan ook van de insteling LDR de opdracht methoden en machines te ontwikkelen

Tabel 1. Mijlpalen in de röntgenastronomie

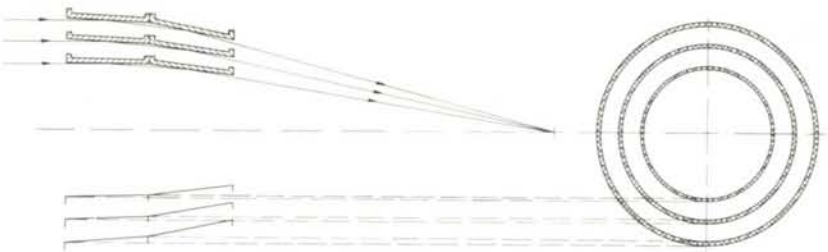
op	werd door	onderzocht	met behulp van
5-8 '48	US Naval Res Lab	rö.-straling van de zon	V2-raket, Geiger teller
12-6 '62	Ricardo Giaconi	rö.-ster SCO X-1	raket
eind '70	NASA	ruimteverkenning 300 rö.-bronnen	satelliet, gecollimeerde tellers
1977	NASA	nader onderzoek gevonden bronnen	idem (HEAO-A satelliet)
1978	NASA	eerste afbeeldende ruimtetelescoop	HEAO-B sateliet high resolution imager (microchannel plate)
sinds'82	ESA	rö.-spectroscoop	rö-sat. EXOSAT proportionele teller gas-scint. spectr.
sinds juni '90	DLR/MPE	ruimte-onderzoek en rö-spectrom.	ROSAT

De röntgenastronomie-satelliet ROSAT

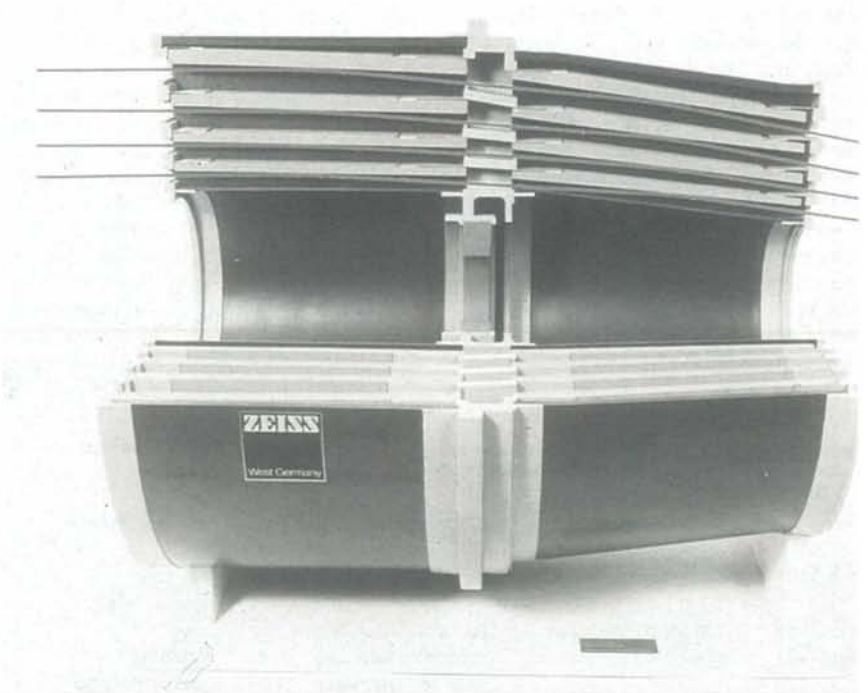
voor het maken van grote röntgenspiegels. Om de bewerkingsmethodes te kunnen testen, was een proefmodel op ware grootte nodig, waarin slechts een van de vier in het uiteindelijke ontwerp voorkomende spiegelparen geheel behoefde te worden afgewerkt. Het gereedkomen van dit proefmodel, zes jaar later, was een belangrijk moment in de ontwikkeling van de ROSAT. Het aanvankelijke ontwerp voor de 80-cm Wolter-telescoop werd in de loop van de tijd op vele punten gewijzigd, zowel op grond van technische ontwikkelingen, als door veranderende wensen en financiële omstandigheden. Zoals vaak in dergelijke gevallen, wisselden de plannen van het ene uiterste tot het andere. Er is bij voorbeeld de zogeheten ROBISAT geweest - BI voor 'billig', goedkoop - een toevoeging die echter al snel weer verdween, maar ook de uiteindelijk uitgevoerde versie met zijn prijs van 260 miljoen DM. Deze krachtige en goed functionerende satelliet is, zeker in vergelijking met andere, soortgelijke projecten, tegenover de belastingbetaler zeer wel te verdedigen. Bij de uitvoering van het ROSAT-project was een groot aantal bedrijven betrokken. Dornier als hoofdaannemer en opdrachtgever voor de verschillende ontwikkelingsprojecten en produktiefasen, MBB, Telefunken en Carl Zeiss te Oberkochen. Een aantal opdrachten betreffende ontwikkeling en bouw van het spiegelsysteem gaven wij op onze beurt weer door aan firma's die over de daartoe nodige kennis en ervaring beschikten. Zo leverde Schott de Zerodur-gietstukken voor de spiegels, de Duitse Balzers GmbH had de zorg voor de reflecterende goudbedekking van de spiegels, VEW leverde de speciale Invar-soort voor de draagconstructie voor de spiegels, en een afdeling van Dornier de CFK-onderdelen (CFK: koolstof-versterkte kunststof) in de uiteindelijke versie. De Alfling-Keßler-Werke zorgde voor de uitricht-opstelling en W&P in Stuttgart voor de transportverpakking. Voor een aantal van deze firma's stelden deze opdrachten geheel nieuwe eisen en problemen. Door goede samenwerking en alle inzet van alle betrokkenen kon in alle gevallen aan de eisen worden voldaan.

Boven al deze inspanningen stond de DLR, met haar project-team dat het totale project op bekwame wijze naar het einddoel leidde. Al deze verhoudingen en betrekkingen moeten hier zeker worden vermeld, aangezien zij dé factor vormen die, hoewel nauwelijks in geld of technische specificaties te vangen, van het allergrootste belang zijn voor het welslagen van een project van deze omvang.

Figuur 2. Stralengang in een parabolische spiegel.



Figuur 3. Een drievoudige concentrische Wolter-telescoop (schematisch). Door de scherende inval der straling bestaat het stralingsinvangende oppervlak slechts uit een drietal smalle ringvormige gebieden. Daarom gebruikt men bij voorkeur meervoudige, concentrische systemen, teneinde een voldoende totale intensiteit op te vangen.



Figuur 4. De Wolter-telescoop, een opengewerkt model van het door Zeiss vervaardigde spiegelsysteem voor de ROSAT.

Op 20 juni 1988 werd de voltooide telescoop met een speciaal transport van Zeiss naar Dornier vervoerd om daar in de satelliet te worden ingebouwd en getest, voordat de laatste voorbereidingen werden getroffen voor transport naar Cape Canaveral.

Daar zien wij elkaar straks weer voor de lancering, maar eerst volgt nu een hoofdstuk over de constructie en de bouw van het spiegelsysteem.

De Wolter-telescoop

Bij een normale, licht-optische spiegel vallen de afbeeldende stralen in onder een vrij grote hoek op het spiegeloppervlak. Röntgenstraling wordt op deze wijze niet gereflecteerd: de straling zou in het spiegeloppervlak dringen, daar ten dele worden geabsorbeerd, terwijl het restant de spiegel aan de achterzijde verlaat. Röntgenreflectie treedt allen op bij scherende inval. Figuur 2 toont deze situatie voor een van de in figuur 1 weergegeven spiegels van de Astro-8. Dergelijke spiegels convergeren in hun brandpunt alleen de röntgenstraling die vrijwel evenwijdig aan de as invalt (zoals die afkomstig van een oneindig ver weg op de spiegelas staande röntgenster). Hierbij gelden dezelfde wetten als in de klassieke lichtoptica en men heeft dus ook de mogelijkheid om voorwerpen af te beelden die rond de optische as liggen. De combinatie van een parabolische en een hyperbolische spiegel (het klassieke Cassegrain-systeem) levert van zo'n voorwerp een foutenvrije afbeelding. Hans Wolter, fysicus uit Kiel stelde in 1950 voor een dergelijk systeem te gebruiken voor röntgenmikroscopie. De röntgenastronomen hebben dit idee vervolgens overgenomen voor hun telescopen. Voor de bouw van een dergelijke telescoop zijn nog wel enige harde noten te kraken en sinds de jaren 70 hebben zich hiervoor een aantal optische firma's en instituten ingespannen. Figuur 3 geeft een schets van een uit vier coaxiale Wolter-telescopen bestaand systeem. De van links invallende röntgenstraling wordt eerst aan de parabolische spiegels gereflecteerd en vervolgens aan de hyperbolische. De spiegels zijn omwentelingslichamen, zoals een afbeelding (figuur 4) van het viervoudige ROSAT-systeem duidelijk laat zien. Een dergelijk coaxiaal systeem is nodig om een voldoend groot straligsinvangend oppervlak te krijgen, want elke spiegel draagt hiertoe slechts een smalle ring bij (de projectie van de spiegel op het invalsvlak, zoals figuur 3 laat zien) De essentiële afmetingen van het ROSAT-systeem zijn:

opening	grootste spiegel	83,5 cm
	kleinste spiegel	47 cm
wanddikte	grootste spiegel	2,5 cm
	kleinste spiegel	1,6 cm
spiegellengte		0 cm
brandpuntsafstand		40 cm
stralingsinvangend oppervlak		1141 cm^2.

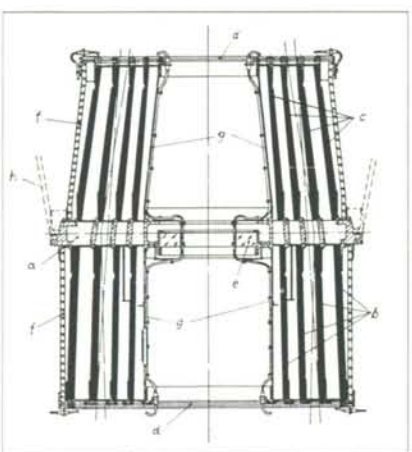
De eisen aan de optische kwaliteit van het systeem blijken uit de volgende waarden:

scheidend vermogen, op de as	5" FWHM
microruwheid spiegelvlakken	<0,5 nm
samenvallen van de foci der spiegels op beter dan	50 µm.

De eerste eis levert de benodigde geometrische nauwkeurigheid van de spiegels, waarbij echter ook de oppervlaktekwaliteit en de montagenauwkeurigheid een rol spelen. De uiteindelijke telescoop overtreft ruimschoots de gestelde eisen.
De tweede eis is uitsluitend een kwestie van polijsttechniek. Ook hieraan kunnen de ROSAT-spiegels royaal voldoen, dankzij de bij Zeiss ontwikkelde methode voor het bewerken van strooilicht-arme spiegels. De methode resulteert in spiegels die het predikaat "de gladste telescoopspiegels ter wereld" met ere dragen en die dan ook als zodanig vermeld zijn in het Guiness Book of Records, hetgeen, met voorbijgaan aan andere kwaliteitseisen nogal graag in krantenberichten wordt vermeld.

De constructie van het spiegelsysteem

De middenflens waaraan de acht afzonderlijke spiegels van het systeem zijn bevestigd (a in figuur 5), dient tevens als grondplaat voor de ophanging van de telescoop in de satelliet. De spiegels zijn met een speciaal voor ruimtevaarttoepassingen ontwikkelde lijm aan dunne Invar-flenzen bevestigd en daarmee aan de middenflens geschroefd. Deze bevestigingsmethode is gericht op een zo gering mogelijke vervorming van de spiegels bij temperatuurvariaties. De optische kwaliteit van het systeem is voor dergelijke vervormingen namelijk uiterst gevoelig. Ondanks deze voorzorgen blijft het noodzakelijk de temperatuur in het spiegelcompartiment van de satelliet gedurende de gehele vlucht op 22 ± 2 °C te stabiliseren, wat voor de satelliet-constructeurs een zeer zware eis is. Ter bescherming van de reflecterende goudlaag op de binnenste spiegels zijn twee dunne buizen (g) aangebracht van koolstof-versterkte kunststof (CFK). Twee buizen (f) van hetzelfde materiaal ondersteunen via dunne Invar-platen (d) de uiteinden van de spiegels. Op deze manier wordt bij standveranderingen tijdens het bewerken en testen van de spiegels op aarde vervorming door de zwaartekracht voorkomen. Bovendien geeft de constructie voldoende stevigheid om de krachten die tijdens de lancering optreden teweerstaan. Aan de buitenkant van de middenflens is een CFK-conus (h) bevestigd waarmee het spiegelsysteem in de telescoopbuis wordt opgehangen. Er was een groot aantal eindige-elementenberekeningen nodig voor de optimalisatie van de gehele constructie. Deze berekeningen werden uitgevoerd door de ontwikkelingsafdeling van Zeiss, in nauwe samenwerking met de constructeurs van de satellietbouwers en de wetenschappers van MPE, die een speciaal röntgen-optiek-programma ter beschikking hadden. De door ons ontwikkelde en in de praktijk beproefde methoden voor het ontwerpen van grote telescopen bleken ook geheel te voldoen aan de eisen voor ruimtevaarttoepassingen. Verder werd ontwikkelwerk gedaan aan lijmproblemen en aan de reflectielaag, die met behulp van sputter-technieken werd aangebracht door de Duitse Balzers GmbH, in samenwerking met opdampspecialisten van Zeiss.



Figuur 5. Doorsnede van de viervoudige concentrische Wolter-telescoop voor de ROSAT. Voor de verklaring der letters, zie tekst.

Het vervaardigen van de röntgenspiegels

Voor de spiegels moesten bij Zeiss voor het eerst grote, zwak conische Zerodur-stukken worden bewerkt. De problemen die de vorm en de daarbij geëiste nauwkeurigheid stelden, waren in principe bekend van de eerder vervaardigde 30-cm Wolter-telescopen. Alleen waren bij de ROSAT de afmetingen driemaal zo groot en de geëiste nauwkeurigheden op sommige plaatsen twintig maal zo hoog. Daardoor moes-

ten nieuwe produktiemethoden worden ontwikkeld en nieuwe machines worden gebouwd voor het polijsten en meten van de spiegels. Bij het slijpen van de paraboloïdale en hyperboloïdale vlakken, respectievelijk b en c in figuur 5, moesten de spiegels in een steunconstructie worden opgenomen (figuur 6), waarin ze werden vastgelijmd op enige honderden afstandsbouten die op de foto duidelijk zijn te zien. Alleen zo waren ze in de verticale stand, waarin de bewerkingen moesten worden uitgevoerd, nauwkeurig in hun vorm te houden. Na zorgvuldig opmeten, waarbij een onrondheid van ten hoogste 1 µm en een vormfout van maximaal 3 µm langs de beschrijvende lijnen van de kegelmantel mochten worden geconstateerd, werden ze uit de steunconstructie gehaald, nogmaals gemeten en weer ingebouwd voor de laatste, in horizontale stand uit te voeren polijstbewerking zie figuur 7. Een bestaande onrondheid kon bij het polijsten niet minder maar hoogstens meer worden. Het was daarom van belang van het begin af aan een zo goed mogelijke rondheid na te streven. Om vervorming te voorkomen bij het neerzetten van de dunwandige spiegels op de granieten plaat waarop het inbouwen moest gebeuren, werd elke spiegel op een aantal punten gesteund op luchtlagers en vervolgens reduceerde men de luchtdruk langzaam tot nul zodat de spiegels zonder spanning of vervorming op hun steunpunten kwamen te staan. Op dezelfde manier werd vervolgens ook de eerder genoemde steunconstructie neergezet, waarna de afstandsbouten met de buitenkant van de spiegel konden worden verlijmd. In dit laatste geval was meer tijd nodig voor voorbereiding, zorgvuldige behandeling en metingen dan voor de eigenlijke bewerkingen.

Deze tijdrovende voorbereidingen voor elke bewerkingsstap bleken uiteindelijk tot het gewenste resultaat te leiden. In tabel 2 zijn de belangrijkste resultaten van de bewerkingen aan de spiegels samengevat.
Ze zijn, als bijdragen in het uiteindelijke foutenbudget, gedeeltelijk opgegeven in boogmaat (boogsec). Elk der fouten vertoont duidelijk een zuiver willekeurige spreiding, hetgeen erop wijst dat de gebruikte technieken kennelijk aan de grenzen van hun mogelijkheden zijn (met uitzondering van de laatste polijstbewerking). Gemiddeld is het resultaat echter duidelijk beter dan de

Figuur 6. ROSAT-spiegel in zijn steuncostructie op de slijpmachine.

Figuur 7. ROSAT-spiegel op de polijstmachine.

gewenste specificatie, zodat er nog enige speelruimte overblijft voor de volgende montagestappen die immers ook nog bijdragen tot de uiteindelijke fout.
De bereikte gladheid van de spiegels, uitgedrukt als de resterende micro-ruwheid (maximaal 0,5 nm volgens de specificatie), is essentieel voor het zuiver in een punt focusseren van de röntgenenergie. De zeer geringe ruwheid die werd bereikt, was het resultaat van speciaal ontwikkelde polijsttechnieken. Hetzelfde geldt voor de nog resterende vormfouten in de spiegeloppervlakken.

Montage en test

Het ROSAT spiegelsysteem werd bij Zeiss geheel gemonteerd en getest. Voor de mechanische tests was eind 1984 een proefmodel gereedgekomen dat één optisch gepolijste spiegel bevatte en zes die slechts geslepen waren. Voor dit model waren uitgebreide statische en dynamische eindige-elementenberekeningen gedaan ter bepaling van stijfheid en dynamisch gedrag (eigenfrequenties, belasting op kritieke plaatsen – zoals lijmverbindingen – vervorming door de zwaartekracht en thermische belasting). Deze berekeningen konden bij tests op een triltafel bij het bedrijf IAGB in Ottobrunn worden geverifieerd. Dergelijke triltests zijn noodzakelijk voor het garanderen van de bedrijfszekerheid van ruimtevaartonderdelen; zij worden doorgaans ook nog eens herhaald met de definitieve onderdelen. Bij het ROSAT spiegelsysteem werd echter van het laatste deel van deze test afgezien vanwege de kwetsbare en niet op korte termijn vervangbare optiek. De uiteindelijke, complete telescoop werd als onderdeel van de gehele satelliet wel aan een triltest onderworpen, maar hierbij lopen de spiegels minder gevaar vanwege de demping door de gehele omringende structuur.

Monteren en uitrichten van het spiegelsysteem moest in een stofarme ruimte gebeuren, niet alleen vanwege stofproblemen, maar vooral ook om te vermij-

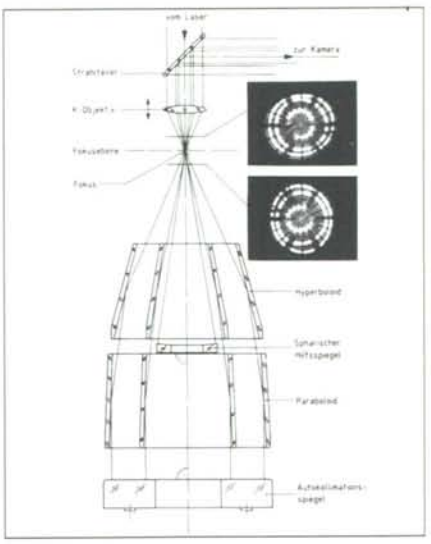
Tabel 2. Bijdragen van de onvolkomenheden in de afzonderlijke spiegels tot de diameter van de afbeelding van een ideale puntbron.

	onrondheid (rms)	afwijking in beschrijvende lijn (rms)	micro-ruwheid (rms)
paraboloïde 1	0,36 boogsec	0,68 boogsec	0,26 nm
,, 2	0,26	0,43	0,36
,, 3	0,18	0,49	0,37
,, 4	0,66	0,42	0,3
hyperboloïde 1	0,55 boogsec	0,82 boogsec	0,18 nm
,, 2	0,86	0,52	0,2
,, 3	0,9	0,52	0,27
,, 4	0,33	0,78	0,31

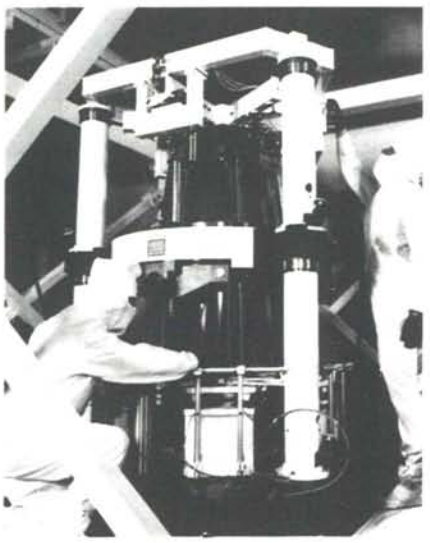
den dat er koolwaterstoffen, die altijd wel in werkplaatslucht aanwezig zijn, op de reflecterende goudlagen zouden condenseren. (Koolwaterstoffen komen in werkplaatslucht door verdampen van olie en weekmakers uit kunststoffen, en door gasontwikkeling uit machines, isolatietiemateriaal, verf en kunststof-beschermlagen.) Maatregelen tegen deze, analytisch vaak nauwelijks aantoonbare, luchtverontreinigingen moeten in uitgebreide proevenseries worden ontwikkeld. Voor het begin van de montage, het moment waarop de goudlagen niet langer beschermd waren, moest bijvoorbeeld de stofarme ruimte drie maanden lang gecontroleerd worden. Hiertoe werden opgedampte goudspiegels enige tijd aan de lucht blootgesteld en vervolgens op kwaliteit beoordeeld. Om deze proeven zo realistisch mogelijk te maken, werden de spiegels steeds door een speciale koeriersdienst naar de röntgen-testopstelling van het MPE in Neuried bij München gebracht en daar gemeten op dezelfde manier als de uiteindelijke telescoopspiegels. Deze controles verliepen met de gebruikelijke kleine ongelukjes, maar leverden uiteindelijk uitstekende resultaten. Dit was niet in de laatste plaats te danken aan de voortdurende inzet van alle betrokkenen bij het gehele project.

De spiegels werden in verticale stand gemonteerd in de steun- en ophangflenzen. Lichtoptische autocollimatormetingen via een hulpspiegel in de middenflens e van figuur 5 maakten hierbij controle van de justering tot op 0,1 boogseconde mogelijk. Figuur 8 toont een vergelijkbare opbouw voor de Hartmann-test ten behoeve van de afleveringscontrole. Figuur 9 laat de montagewerkzaamheden aan het vluchtmodel zien. Hier zijn twee medewerkers bezig met het nauwkeurig uitrichten van het tweede stel spiegels voordat het verlijmen met de reeds met de middenflens verbonden eindflenzen zal plaatsvinden. De montage van het gehele vluchtmodel met acht spiegels duurde – geheel volgens plan – acht maanden, de genoemde drie maanden vergende voorbereiding van de montageruimte hierbij niet meegerekend.

De degelijke planning en de goede coördinatie van alle bij de uitvoering betrokken bedrijven en instituten willen we hier slechts terloops vermelden. Het werk bij Zeiss werd, zoals voor dergelijke projecten gebruikelijk, geheel begeleid door de kwaliteitsdienst, die verantwoordelijk was voor handhaving van alle fabricage- en testvoorschriften en voor de veiligheid tijdens de voortgang. Zo had deze dienst ook de verantwoordelijkheid voor de kwaliteit van het spiegelsysteem dat na tien jaar van ingespannen werken tot stand kwam. De verantwoordelijkheid voor de optische kwaliteit van het 'röntgenoog' lag bij het laboratorium voor technologie en procesontwikkeling, dat de vervaardiging en de montage van de spiegels verzorgde. Het ontwerp van het systeem en van de fabricagehulpmiddelen kwam van het constructiebureau van de afdeling voor Astronomische Instrumenten, Planetaria en Systemen. Berekeningen en constructieondersteuning werden verzorgd door de groep voor nieuwe technologieën van deze afdeling. Met de montage en de daaropvolgende tests was de taak van Zeiss ten einde. Waardoor er daarna – geheel volgens de planning – nog eens twee jaar verliepen tot aan de lancering, zal in het volgende hoofdstuk duidelijk worden.



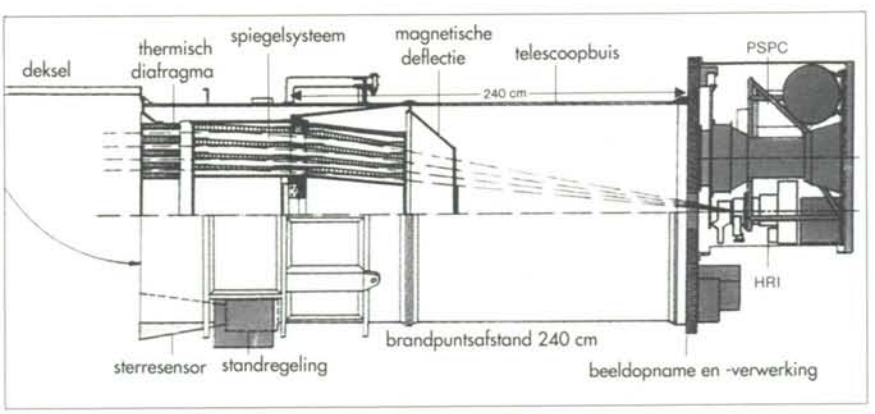
Figuur 8. Optische opstelling voor de Hartmann-test ten behoeve van de afleveringscontrole bij Zeiss.



Figuur 9. Montage van het vluchtmodel van het spiegelsysteem in de stofarme ruimte.

Afwerking en start

Bij Dornier in Immenstaad werd het spiegelsysteem ingebouwd in een gesloten telescoopbuis in de ROSAT zie figuur 10. Aan de ene kant kijkt de telescoop via een thermisch diafragma in de ruimte, aan de andere kant bevindt zich het beeldopnemende en -verwerkende systeem. Dit bestaat uit twee door MPE ontwikkelde proportionele tellers voor verschillende golflengtegebieden. Deze tellers hebben een zo hoog mogelijke gevoeligheid, en daardoor een minder

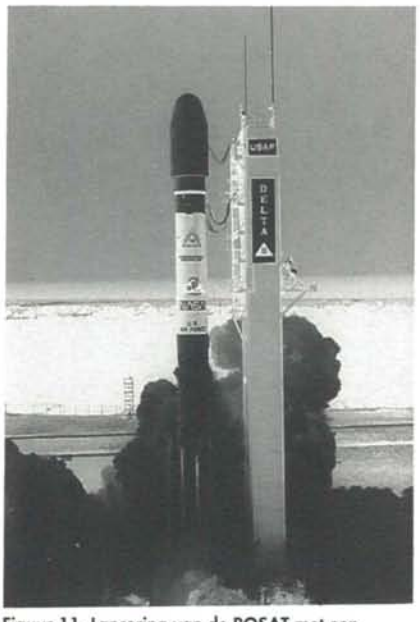


Figuur 10. De ROSAT-telescoop (schematisch). Tekening van MPE, Garching

De röntgenastronomie-satelliet ROSAT

dan maximaal haalbaar scheidend vermogen. Als derde röntgenontvanger is er een 'HRI', een high resolution imager, die desgewenst met een revolvermechanisme op de plaats van de tellers kan worden gebracht. De telescoop bevat bovendien nog een deel van het stand-regelsysteem van de satelliet. De trillingstest die reeds werd genoemd, behoorde eveneens tot de afwerkingsfase; na deze test werd de optische kwaliteit van het spiegelsysteem nogmaals gecontroleerd met een hiertoe aan Dornier geleverde opstelling identiek aan die welke wij in eigen huis gebruikten. Er waren wederom geen veranderingen in de optische kwaliteit meetbaar, wat de beste verwachtingen wettigde voor de verdere afwerkingsfasen. Er waren immers tijdens de assemblage van de telescoop legio omstandigheden geweest die een negatieve invloed op de kwaliteit zouden kunnen hebben gehad (zoals de invloed van de zwaartekracht tijdens langdurige opslag en die van de atmosfeer in de verschillende werkruimtes.

In januari 1990, ten slotte, werd de telescoop in hanteerbare onderdelen uiteengenomen en naar Cape Canaveral vervoerd om daar te worden ingebouwd in de gereedstaande Delta-2 raket met een hiertoe speciaal vergrote neuskegel. Voor de lancering met deze raket moest de constructie van de ROSAT op een paar ondergeschikte punten worden gewijzigd, aangezien oorspronkelijk was uitgegaan van lancering in een Space Shuttle. Na de catastrofe met de Challenger werden alle wetenschappelijke, en met name de niet-Amerikaanse lanceringen tot het volgende decennium uitgesteld, zodat de verantwoordelijke autoriteiten een noodoplossing moesten zoeken. Hoe juist dit besluit is geweest, realiseerden wij ons toen twee dagen voor de lancering van de ROSAT weer een Shuttlelancering werd uitgesteld.
De gesprekken tussen het toenmalige West-Duitse Ministerie voor Research en Technologie en de NASA hadden succes, niet in de laatste plaats omdat de Amerikaanse ruimtevaart-officials met de HRI zelf bij het project betrokken zijn en in ruil voor de kosteloze lancering een aandeel kregen in de wetenschappelijke 'opbrengst' van de gehele onderneming.
Uiteindelijk brak de geplande lanceringsdatum, 31 mei 1990, aan en na

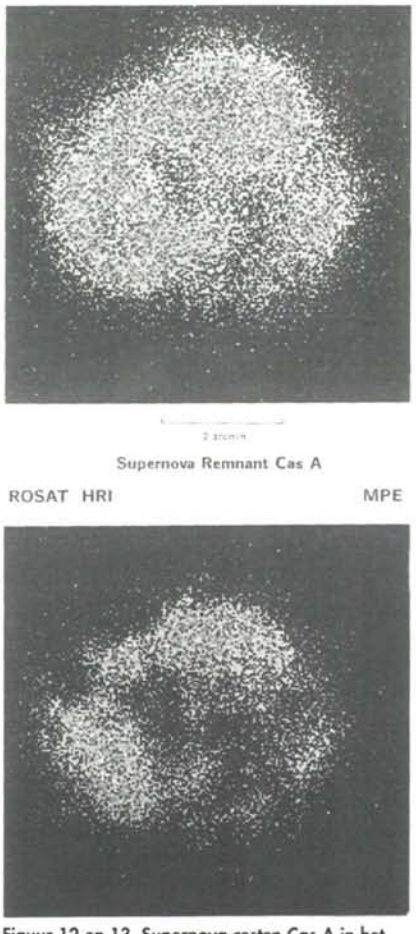


Figuur 11. Lancering van de ROSAT met een Delta-2 raket op Cape Canaveral, 1 juni 1990 (foto NASA).

vertraging met slechts een dag volgde op 1 juni 1990 een perfecte start, waarover de nieuwsmedia uitvoerig verslag hebben gedaan. Figuur 11 laat de Delta-raket zien op het lanceerplatform, kort na het ontsteken van de aandrijfraket. De medewerkers bij Zeiss konden de lancering volgen in het ruimtevaart-controlecentrum Oberpfaffenhofen, of in Cape Canaveral. Zij weten inmiddels dat hun spiegels ook deze beproeving hebben doorstaan.

De taak

Nog een paar woorden over de taak die de ROSAT gedurende de 18 maanden van de geplande levensduur te vervullen heeft gekregen ten behoeve van de wetenschap. Na een testfase van ongeveer acht weken volgde een half jaar waarin een overzicht van de röntgenbronnen in het heelal werd gemaakt. Zo'n 50.000 – 60.000 nieuwe bronnen zijn hierbij gevonden. Inmiddels is een aantal interessante objecten door fysici en röntgenastronomen aangewezen voor nader onderzoek. Daarmee was het resterende jaar meer dan gevuld.
Eerste aanwijzingen, samen met het feit dat de baan op 580 km hoogte ligt, wettigen de hoop op een langere levensduur. Dit was maar goed ook, want al zes weken na het begin van de



Figuur 12 en 13. Supernova-resten Cas A in het sterrenbeeld Cassiopeia; figuur 12 is verkregen met behulp van de PSPS-detector, figuur 13 met de HRI-detector. Deze opnamen behoren tot de eerste die met de röntgentelescoop van de ROSAT werden verkregen (foto's MPE, Garching).

waarnemingen presenteerden Prof. Trümper en zijn medewerkers op een persconferentie en een eerste colloquium in het MPE te Garching waarnemingsresultaten uiteenlopend van röntgenemissie door het maanoppervlak tot beelden van supernova-resten, neutronensterren en elkaar verzwelgende sterrenstelsels.
In april 1991 kon Prof. Trümper, ondanks een in januari opgetreden, maar snel verholpen technische storing, nieuwe röntgenastronomische resultaten presenteren.

Wij hopen dat onze spiegeltelescoop zijn fraaie gouden oog nog lang mag behouden, dat geen meteoriet er zich aan zal vergrijpen en dat niemand de ruimte met koolwaterstoffen verontreinigt.

Literatuur

Aschenbach, B.: Design, construction and performance of the ROSAT high resolution X-ray mirror assembly, Appl. Optics 27(1988).

Aschenbach, B., H.Bräuninger, G.Kettenring: Design and construction of the ROSAT 5 arcsec mirror assembly, Adv. Space Res.**2**, no.4, 251 (1983).

Beckstette, K.: Aspects of manufacturing grazing incidence X-ray mirrors, SPIE ***645***, 58(1986).

Beckstette, K.: Mirror fabrication and metrology for ROSAT, RAL Workshop 1986 (RAL 87-043), S.118.

Beckstette, K., B.Aschenbach, M.Schmidt: Assembly of the ROSAT Flight X-ray Mirror System, SPIE ***982***, 2(1988).

Beckstette, K., E.Heynacher: Contour line measurements on ROSAT X-ray mirrors, SPIE ***429***, 126(1983).

Heynacher, E., B.Aschenbach: Superglatte optische Flächen für den Röntgensatelliten ROSAT, Zeiss Inform., Oberkochen, ***30***, 27(1989), Heft 100.

Heynacher, E., D.Reinhardt: Measuring equipment for testing the directrix of high resolution Wolter-type telescopes, SPIE ***184***, 167 (1979).

Hintsches, E.: Bisher kein Röntgenlicht von der Supernova (Einsatz eines 32-cm-Wolter-Teleskops), MPG-Spiegel 5/1987, S.1.

Reinhardt, D.: Zeiss Röntgenteleskope für die Supernova-Forschung, Zeiss Inform., Oberkochen, ***23***, 62(1978), Heft 87.

Reinhardt, D.: Röntgenteleskope, Zeiss Inform., Oberkochen, ***24***, 55 (1979), Heft 89.

Reinhardt, D.: Das Spiegelsystem für den deutschen Röntgensatelliten ROSAT, Feinwerktechnik und Meßtechnik ***93***, 251(1985).

Reinhardt, D.: ROSAT mirror system, features of design, assembly and qualification, RAL Workshop 1986 (RAL 87-043), S.95.

Reinhardt, D.: Montage des Spiegelsystems für den deutschen Röntgensatelliten ROSAT, Produktion Nr.51/52 (1988), S.3.

Trümper, J.: ROSAT, Sterne u. Weltraum ***29***, 222(1990, Nr.4).

Van Speybroeck, L.P.: Einstein Observatory (HEAO-B) mirror design and performance, SPIE ***184***, 2(1979).

Young, P.S.: Fabrication of the high-resolution mirror assembly for the HEAO-2 X-ray telescope, SPIE ***184***, 131(1979).

Dit artikel is een vertaling en bewerking van "ROSAT – Mit Röntgenspiegeln von Carl Zeiss im All" verschenen in Zeiss Information, 31, 19–25 (1991)

Auteursnoot
Dieter Reinhardt, Afdeling Astronomische Instrumenten, Planetaria en Systemen van de firma Carl Zeiss te Oberkochen, Duitsland.

Actueel

NIL-Researchdag
Van onderzoek naar praktijk.....

Op 12 november 1992, Congresgebouw Den Haag.
Kennis moet niet worden begraven of in stoffige rapporten in kasten worden weggestopt, maar moet worden uitgedragen ten behoeve van de industrie. De komende NIL-Researchdag biedt hiervoor alle gelegenheid. Het Nederlands Instituut voor Lastechniek houdt zich met meer bezig dan alleen het lassen van metalen; het aandachtsgebied omvat het geheel van het verbinden van materialen. Wat de materialen betreft, behoren naast metalen ook kunststoffen en keramische materialen tot het werkterrein. Het verbinden heeft betrekking op de meeste vormen van verbindingstechnieken, zoals booglassen (met beklede elektroden, MIG/MAG, TIG, OP) stiftlassen, weerstandlassen; maar ook robotlassen, laserverbinden, solderen, ultrasoonlassen en lijmen. Bovendien krijgt microverbinden alle aandacht. Met behulp van deze technieken worden produkten gemaakt. De aspecten veiligheid en betrouwbaarheid zijn daarom van groot belang.
Op al deze gebieden initieert en coördineert het NIL onderzoeksprojecten. In een aantal gevallen wordt de coördinatie uitgevoerd in samenwerking met Centrum Staal, Aluminium Centrum, Nederlands Corrosie Centrum of de Bond voor Materialenkennis. Aan deze onderzoeken wordt deelgenomen door meer dan 250 Nederlandse bedrijven en zo'n 15 onderzoeksinstellingen. Tot de laatste behoren de Nederlandse Technische Universiteiten, TNO, KEMA, ECN, enz. Onder de deelnemende bedrijven bevinden zich zeer grote ondernemingen, maar ook het MKB is ruimschoots vertegenwoordigd.

Behalve het initiëren en coördineren van onderzoek behoort ook voorlichting tot de taken van het NIL. Hiervoor organiseert het NIL op 12 november 1992 in het Congresgebouw in Den Haag een grote NIL-ResearchDAG. In meer dan 20 lezingen, in 4 parallel lopende sessies, zal gedurende deze conferentie de laatste stand van de techniek door vooraanstaande specialisten op het gebied van verbinden en materialen ten gehore worden gebracht. De nieuwste ontwikkelingen van metalen en kunststoffen zijn daarbij; het aanbrengen van oppervlaktelagen door middel van oplassen en thermisch spuiten; lassen met gevulde draden, weerstandlassen en lassen met robots; lassen van kunststoffen zoals HDPE leidingen en engineering plastics; maar ook bezwijkanalyse en inspectie van pijpleidingen. Het NIL heeft getracht om de vele gebieden van onderzoek in relatie tot verbinden en materialen aan de orde te laten komen gedurende één dag wordt u helemaal geïnformeerd over de mogelijkheden van vandaag.

Voor nadere informatie:
Telefoon: 070 - 3 658 900.

Her en Der

Online meten van de zethoek

Verandering van de gewenste zethoek door elastische terugvering is een vaak terugkerend probleem bij het zetten van plaat. Controle van de gezette hoek is gewoonlijk pas mogelijk nadat het werkstuk uit de machine is genomen. Voor correctie van de gezette hoek moet de plaat weer in de machine gelegd worden, hetgeen tijdrovend en daardoor kostbaar is. Het zou daarom voordelig zijn wanneer de aan de plaat gezette hoek kan worden gemeten terwijl de plaat nog in de machine zit.

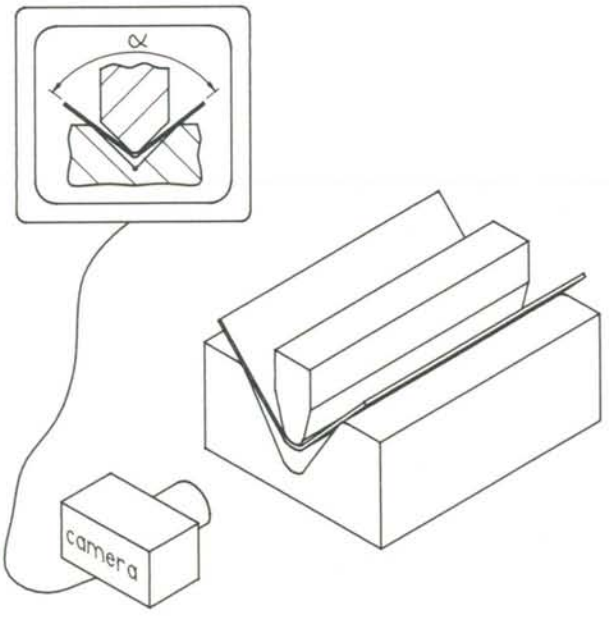
Aan de Universiteit van Dortmund is men reeds ver gevorderd met de ontwikkeling van een systeem waarmee het mogelijk is de zethoek online in de kantbank te meten. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van een CCD-camera en een PC met VGA-monitor.
Met de CCD-camera die aan het einde van de zetmatrijs (zetbalk) geplaatst is, zie figuur, wordt het beeld van de teruggeveerde gezette plaat in de matrijs vastgelegd in pixels (beeldpuntjes). Bij de beeldverwerking met de PC moet de plaat van de matrijs kunnen worden onderscheiden. De door de TU ontwikkelde software maakt hierbij gebruik van een verschil in kleur. De matrijs heeft een vaste (aangebrachte) kleur, terwijl die van de plaat anders is. Door verschil in kleur van de plaat met de achtergrond kan herkend worden welke pixels nog tot de plaat behoren. De rand van de plaat wordt herkend door de kleurovergang met de achtergrond. Met behulp van een zoekroutine in het computerprogramma worden alle pixels opgezocht die tot de plaat behoren. Deze worden op het beeldscherm in een fel-contrasterende kleur rood weergegeven, zodat de gebogen plaat sterk opvalt.

Tevens zoekt het computerprogramma ook de pixels op die langs de rand van de plaat liggen, zodat de omtrek bekend is. Uit deze omtrek wordt de neutrale lijn van de doorsnede berekend met een nauwkeurigheid van 1/3 pixel. De werkelijke zethoek wordt berekend uit de hoek die elk van de benen van de neutrale lijn met de horizontaal maken.
Met de tot nu toe ontwikkelde software bleek het mogelijk een nauwkeurigheid van kleiner dan een graad te bereiken. Een op deze wijze gemeten hoek van 99,5 graden was in werkelijkheid 100,2 graden.

De nauwkeurigheid van het systeem hangt af van de grootte van het zogenaamde meetvenster (dus van de gebruikte vergroting) en de dikte van de plaat. De lengte waarover gemeten wordt moet tenminste tweemaal de plaatdikte zijn om een goed resultaat te bereiken. Een meetlengte van 30 pixels geeft reeds bevredigende resultaten, zodat aan de hand van deze gegevens het meetvenster (de vergroting) kan worden ingesteld.
De belangrijkste bottleneck bij de ontwikkeling is de herkenning van de gezette plaat. Door verschillen in helderheid en reflectie zijn sommige delen van het plaatoppervlak moeilijker te herkennen. Aan verbetering van de herkenning wordt nog gewerkt.

Literatuur
J. Frank, F. Maevus, H. Sulaiman, Online erfassen, Industrie Anzeiger 34 (1992) 34, p.24-26

Samenvatting en tekening door Robert Mik, student FMT.



Online meten op een kantbank van de aan een plaat gezette hoek. Afwijking van de gewenste hoek door elastische terugvering van de plaat wordt meteen zichtbaar en kan direct worden hersteld en gecontroleerd.

Lasermeettechniek, verplaatsingssensoren, laserscanners
op donderdagavond 29 oktober van 19.45 tot 22.00 uur
Aristozalencentrum, Teleportboulevard 100, Amsterdam (A10, afslag S102 of S103)
Thema-avond georganiseerd door de Regionale Werkgroep Amsterdam
Aanmelden bij W. Mels, telefoon 020 - 5485333

Statisch bepaalde rechtgeleidingen berustend op afrolling bedoeld voor nauwkeurig positioneren

E.A.G. Reker

Vrijheidsgraden

Bij het vastleggen van de positie van een lichaam in de ruimte schrijft men een voldoende aantal *onafhankelijke coördinaten* voor. De positie van een star lichaam bijvoorbeeld, wordt volkomen vastgelegd door het voorschrijven van 3 translatie- en 3 rotatiecoördinaten. Deze onafhankelijke coördinaten noemt men de *graden van vrijheid.* Een lichaam is *statisch bepaald* als elke graad van vrijheid juist één keer is voorgeschreven.
Wordt een coördinaat op meer dan één manier voorgeschreven dan is er sprake van een statisch onbepaalde constructie (statische vergelijkingen voldoen dan namelijk niet meer om de oplegkrachten te bepalen). Bij een rechtgeleiding wordt één vrijheidsgraad (de langsbeweging) meestal door een aandrijving verzorgd, de overige vijf door de geleiding. De aandrijving zelf wordt hier buiten beschouwing gelaten.
Schematisch zien 5 vastgelegde vrijheidsgraden er uit als figuur 1 zodat één translatie overblijft: de peilrichting.

Zuiver rollen

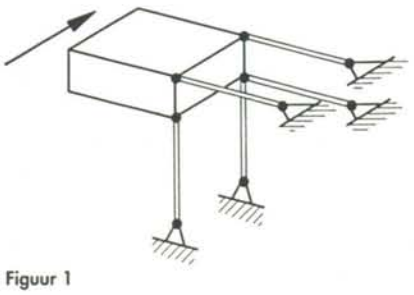
Stel dat tussen starre lichamen puntcontacten met aanraakoppervlak gelijk aan nul zouden bestaan. In dat geval kunnen wij zuiver rollen op basis van figuur 2 als volgt definiëren: in het raakvlak zijn de snelheden gelijk van richting en grootte $(v_{r1} = v_{r2})$ en de hoeksnelheden langs de normaal (N) zijn gelijk (spin: $\omega_{s1} = \omega_{s2}$). We zullen echter zien dat in de contacten tussen elastische lichamen, zoals die werkelijk voorkomen, geen zuiver rollen bestaat.

Spinnen

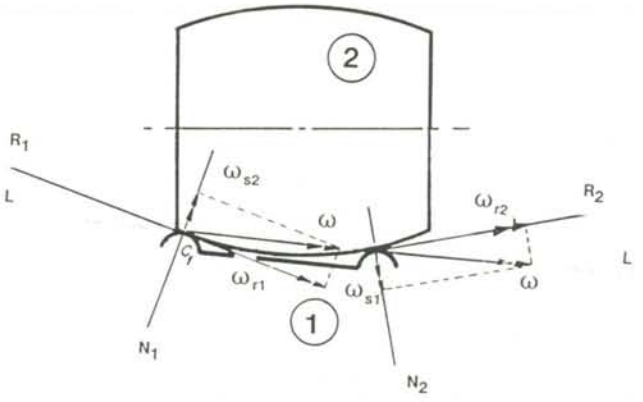
Als er twee van de bovenomschreven, *ideale contactpunten* tussen de lichamen zijn, die echter geen gemeenschappelijk raakvlak hebben, zie figuur 3, dan bestaat geen zuiver rollen.
Laat lichaam 1 stilstaan. Dan roteert 2 momentaan om de lijn L door de contactpunten C1 en C2 (de rolpool-as) met de hoeksnelheid ω. In de respectievelijke contactpunten is ω te ontbinden in de zuivere rolhoeksnelheid ω_r en de spin ω_s. Spin betekent derhalve slip in de contactvlakjes en is verantwoordelijk voor rolwrijving, voor slijtage en voor het verlagen van de maximaal beschikbare wrijvingskracht in het raakvlak $(|W| = \mu N)$. Dit is nadelig als een beroep op tractie wordt gedaan.
In rollende constructies komt spin vaak voor. Voorbeelden zijn de bekende (voorgespannen) vierpuntslagers, zie figuur 4, en een veel gebruikt soort rollen in rechtgeleidingen, zie figuur 5.

Statisch bepaalde rolgeleiding

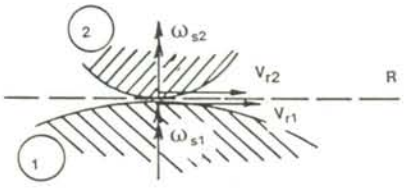
Figuren 6a en 6b tonen een lichtlopende statisch bepaalde spelingsvrije rolgeleiding met elastisch voorgespannen rollen. Hierbij is van het principe uitgegaan dat er voor elk der vijf vrijheidsgraden één star aan de wagen bevestigde rol (A) is die de positie bepaalt, terwijl andere rollen (B) een veel lagere stijfheid hebben en een zodanige vóórspanning dat de eigenlijke geleidingsrol onder alle omstandigheden in contact blijft met de geleiding.
Als er sprake is van een "meerijdende"



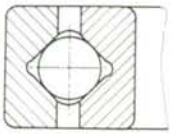
Figuur 1



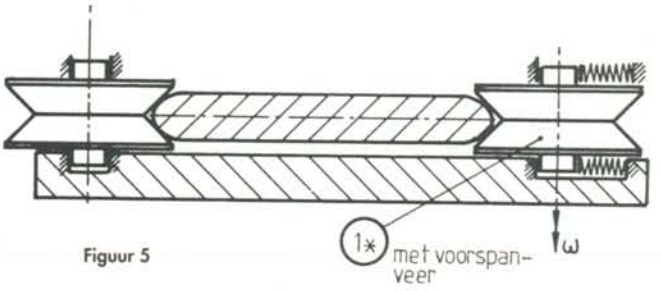
Figuur 3



Figuur 2

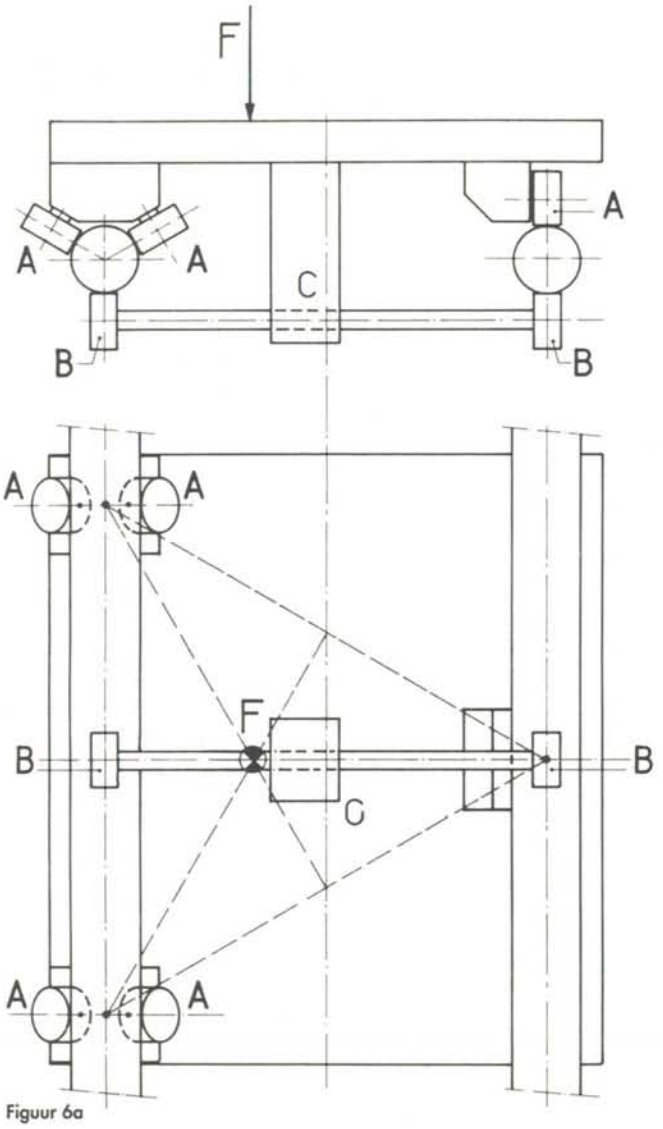


Figuur 4

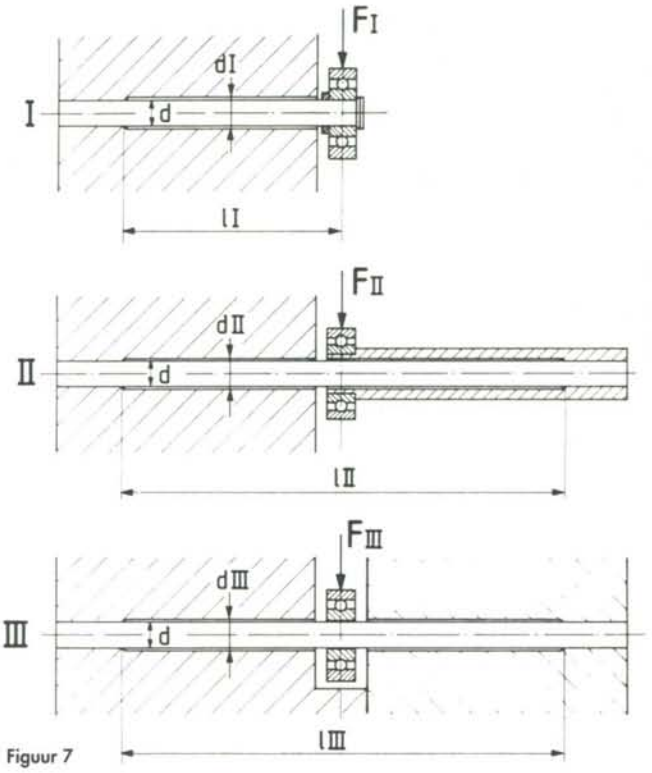


Figuur 5

Statisch bepaalde rechtgeleidingen berustend op afrolling bedoeld voor nauwkeurig positioneren



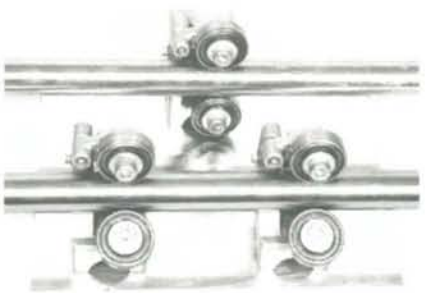
Figuur 6a



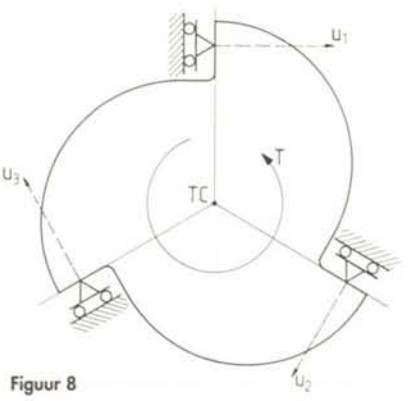
Figuur 7

dwarskracht F dan krijgt men de laagste rolbelasting (*1/3* F + de veervoorspanning) als de beide geleidebanen liggen in een vlak loodrecht op F en F aangrijpt in het zwaartepunt van de drie opleggingen.
Als de dwarskracht F echter gericht is op de hoofdgeleidebaan dan kan men de tweede geleidebaan, die nu alleen dient om rotatie van de wagen te verhinderen, beter *in* het vlak van F en de hoofdbaan plaatsen. Alleen dan geeft een doorbuiging van die hoofdbaan geen aanleiding tot rotatie van de wagen.
Opgemerkt wordt dat de afstand tussen de assen kwadratisch doorwerkt in de hoekstijfheid van de constructie.
In figuur 7 zijn de voorgespannen rollen voor het voorspannen gelagerd op een elastisch verende pen (in dit geval een standaard ponsnippel) die in een deels uitgeboord gat geperst wordt en met loctite tegen loswerken wordt geborgd.
De elasticiteit van de pennen die de rollen B dragen is zo groot dat de toleranties op de roldiameter en de diameter van de geleidingsstaven de voorspankracht slechts weinig van de bedoelde waarde doen afwijken.
Het uitgeboorde gat geeft de pen de gewenste bewegingsvrijheid, bij overbelasting blijft de uitbuiging van de pen beperkt.
Bij een gegeven kogellager of looprol is de pendiameter d een gegeven en kunnen we de vrij verende lengte ℓ kiezen.
In principe wil men een zodanige lengte dat bij de maximale rolbelasting de invering de gewenste waarde heeft – bijvoorbeeld 5 of 10 maal de som van de tolerantie van de rollen en de geleidingsstaven.

Uitvoering I geeft een scheefstand (hellingshoek ϕ) bij belasting en is alleen geschikt voor rollen die op een *ronde* geleide-as lopen. Dan is de Hertze-contactspanning tussen rol en (geharde) as maatgevend en zijn slechts relatief lage



Figuur 6b



Figuur 8

TABEL I. KOGELLAGERS OP GEHARDE AS.
(Uitvoeringsvorm I)

Kogellager [mm]	3×10	4×13	5×16	6×19	8×22
Pendiameter d [mm] (= lagerboring)	3	4	5	6	8
Vrije penlengte ℓ_I [mm] (bij f_{Imax} = 0,5 mm bij belasting F_{Imax})	34	42	49	56	74
Veerstijfheid c_I [N/mm]	61	110	162	250	312
Toelaatbare F_{Imax} *) [N]	32	53	80	115	154
Uitboormaat d_I [mm]	4,5	5,6	6,8	7,8	10,6

*) De som van voorspanning, eigengewicht, bewerkingskrachten, versnellingskrachten, etc. moet kleiner zijn dan F_{Imax}.
De diameter van de geharde as is gelijk gekozen aan die uitwendige lagerdiameter waarbij σ_{Hz} = 1500 N/mm² in het contactpunt tussen kogellager en as.

TABEL II. KOGELLAGER OP EEN GEHARD VLAK.
(Uitvoeringsvorm II)

Kogellager [mm]	4×13 5×16	5×16 6×19	6×19 8×22	8×22	10×30
Pendiameter d [mm] (< lagerboring)	3	4	5	6	8
Vrije penlengte ℓ_{II} [mm]	38	44	50	54	64
Veerstijfheid c_{II} [N/mm]	160	350	600	960	1920
Belasting F_{IImax} [N] (bij f_{IImax} = 0,5mm en σ_b = 600 N/mm²)	79	175	300	480	960
Opboormaat d_{II} [mm]	3,5	4,5	5,5	6,5	8,5

TABEL III. KOGELLAGER OF LOOPROL OP EEN GEHARD VLAK.
(Uitvoeringsvorm III)

	Kogellager op bus		Looprol		
	4×13	6×19	5×16	6×19	8×24
Pendiameter [mm]	3	4	5	6	8
Vrije penlengte ℓ_{III} [mm]	76	88	100	108	128
Veerstijfheid c_{III} [N/mm]	315	700	1200	1950	3820
Belasting F_{IIImax} [N] (bij f_{IIImax} = 0,5 mm en s_b = 600 N/mm²)	158	325	600	960	1900
Opboormaat d_{III} [mm]	4	5	6	7	9

belastingen F_{Imax} toelaatbaar. Een gewoon kogellager komt met deze belastingen F_{Imax} op een vrijwel onbegrensde levensduur.
In tabel I is de lengte van de pen zo gekozen dat bij F_{Imax} de doorbuiging f_I ≈ 0,5 mm is.
N.B.: Met deze doorbuiging is het draagvermogen van de lagers geheel gebruikt voor het opnemen van de voorspanning en is er dus geen reserve meer voor het opnemen van gelijkgerichte gewichten of bewerkingskrachten.
De veerstijfheid is in de tabel I opgenomen, zodat men gemakkelijk de noodzakelijke veerweg kan bepalen voor een voorspanning $F_I < F_{Imax}$.
De uitboormaat d_I is zo bepaald dat de pennen bij overbelasting vrij doorbuigen tot de buigspanning in de pennen ca. 600 N/mm² is.

Uitvoering II is iets gecompliceerder dan I, maar is nog wel gebaseerd op eenzijdige bevestiging. Het grote voordeel is dat de hellingshoek ϕ = 0 is. De belastbaarheid op Hertze-vlaktedruk in het afrolpunt is bij een rol op een vlak tientallen malen hoger dan bij een rol op een ronde as. De buigspanning in de pen wordt nu de belastingbepalende factor, mede omdat men voor deze uitvoering een lager moet nemen met een boring die één of twee maten groter is dan de pendiameter. Hierdoor kan men dan steeds met een gewoon kogellager uitkomen, zie tabel II.

Uitvoering III vergt tweezijdige bevestiging. De hellingshoek is altijd 0. Hier heeft het zin om in plaats van kogellagers de duurdere maar hoger belastbare looprollen te nemen, althans voor de penmaten >5 mm. Zie tabel III.

Tabel IV geeft de bijbehorende belastingen voor de betrokken lagers.
Voor de kogellagers en looprollen is uitgegaan van een levensduur van 10.000 uur bij ca. 60 omw/min op interne vermoeiing (C/P=3, zie kogellagercatalogi).
Bij lijncontact tussen rol en vlakke baan is de toelaatbare contactkracht hoger dan de toelaatbare lagerbelasting, die bij deze niet ingebouwde kogellagers vrijwel geheel door telkens slechts één kogel moet worden opgenomen.

Rechtgeleiding met thermisch centrum

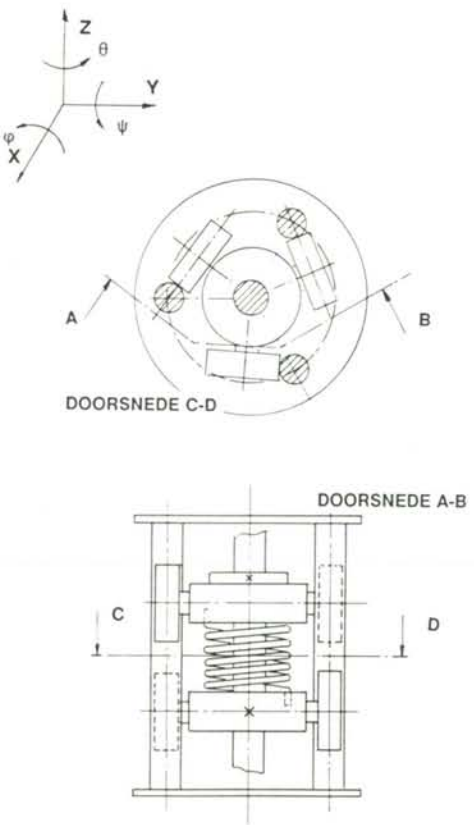
Op het belang van het aanwezig zijn van een thermisch centrum (TC) in een

Statisch bepaalde rechtgeleidingen berustend op afrolling bedoeld voor nauwkeurig positioneren

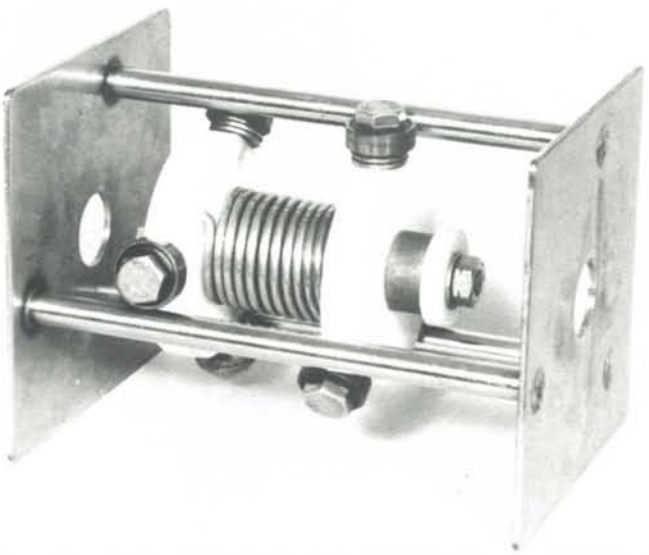
TABEL IV. BELASTINGEN VOOR DIVERSE LAGERS

Maximaal toelaatbare belasting [N]	Kogellager							Looprol (INA – NATV)		
	3×10	4×13	5×16	6×19	8×22	10×30	12×32	5×16	6×19	8×24
Kogellager ingebouwd	130	240	290	440	850	1330	1800	1200	1300	1900
Als looprol op vlakke strip	95	175	215	325	625	975	1325	1200	1300	1900
Als looprol op geharde as*	32	53	80	115	154	290	331	80	115	186

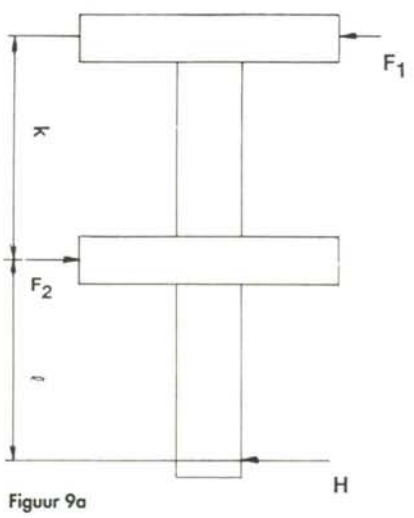
* De diameter van de geharde as is gelijk gekozen aan die uitwendige lagerdiameter waarbij σ_{Hz} = 1500 N/mm² in het contactpunt tussen kogellager en as.



Figuur 9



Figuur 9b



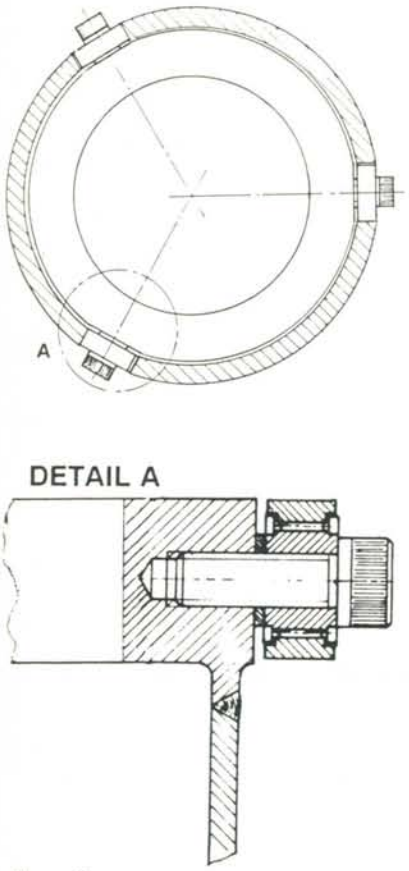
Figuur 9a

constructie is elders ingegaan [1]. (TC is het punt of de lijn die op zijn plaats blijft bij homogene temperatuurverandering ondanks verschillen in uitzettingscoëfficiënt van de samenwerkende onderdelen.)
Figuur 8 toont dit principe: in de oplegpunten zijn de 3 vrijheidsgraden vastgelegd, het koppel T zorgt voor krachtsluiting, in radiale richting is er in elk oplegpunt volkomen vrijheid. Het gevolg is dat de hartlijn (TC) op zijn plaats blijft.

Een rechtgeleiding kan worden gerealiseerd volgens het in figuur 9 geschetste principe; figuur 9b toont hiervan de technische uitvoering
Dit bestaat uit twee onderling gelagerde schijven, elk op de omtrek voorzien van drie kogellagers die rollen over de assen van een kooi. Die kogellagers worden tegen de assen gedrukt door een moment M dat geleverd wordt door een torsieveer.
Door deze constructie is de positie van het lichaam volledig vastgelegd. Kijken we naar het aantal vrijheidsgraden, dan legt de bovenste schijf twee verplaatsingen (x, y) en een hoekverdraaiing (θ) vast. De tweede schijf legt tevens twee verplaatsingen (x, y) vast, waardoor de overige hoekverdraaiingen (φ, ψ) aan de bovenste schijf opgelegd worden. We houden dus nog een graad van vrijheid over, namelijk z welke door de aandrijving opgelegd wordt.

De op één schijf toelaatbare radiale kracht F is afhankelijk van het moment M en de straal R waarop de lagers zich bevinden: $F = 1/2 \,.\, M/R$.

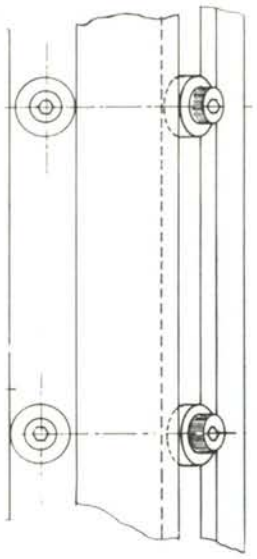
Bij een grotere kracht treedt loslaten van een van de rollen op.
Brengen we op het geheel een radiale



Figuur 10a

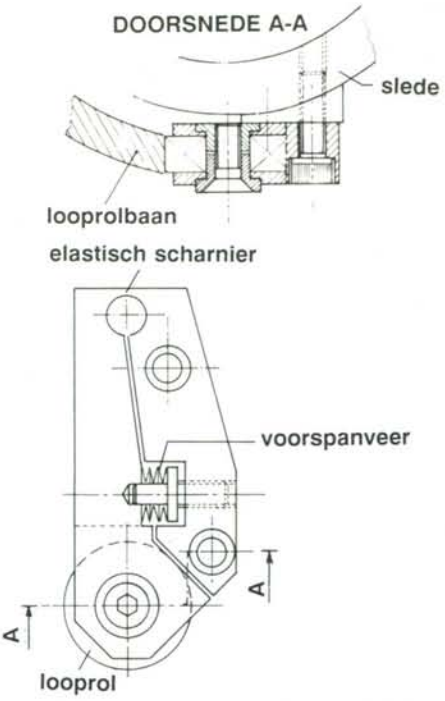
belasting H aan zoals in figuur 9a dan kan deze als functie van de geometrie van de rolgeleiding berekend worden.
De maximaal toe te laten belasting H wordt dan $H_{max} = 1/2 \,.\, k/(k+\ell) \,.\, H/R$.
Met deze formule is direct te berekenen of de gewenste rolgeleiding voldoende radiale belasting op kan nemen zodat geen enkel lager loskomt van de as.

Een verbeterde uitvoeringsvorm is weergegeven in figuur 10 a. De rechtgeleiding bestaat uit een buitenbuis met daarin een eveneens buisvormige slede. Deze laatste wordt door middel van vijf vaste, aan de slede bevestigde, looprollen rechtgeleid en met één rol voorgespannen.
Twee rollen lopen tegen tegenoverge-



Figuur 10b

stelde zijden van een sleuf, zie figuur 10 b. Er zijn dus in totaal drie sleuven in de buitenbuis voor de zes rollen
De voorspankracht waarmee de looprollen tegen de loopbanen worden gedrukt wordt door een pakket schotelveren geleverd, zie figuur 10c. De looprolas bevindt zich op een hefboom die roteert om een elastisch scharnier.
Dit mechanisme heeft een grote stijfheid gepaard aan een compacte constructie. Door de buisvormige constructie is er veel ruimte om de aandrijving centraal uit te voeren, zodat de traagheidskrachten geen momenten en daarmee variërende looprolkrachten kunnen opwekken. De bewegende massa, die bepalend is voor de dynamische krachten op de aandrijving, is geminimaliseerd door de stijve verbinding tussen de beide ringen uit te voeren als dunwandige buis van grote diameter. De dikwandige ringen waaraan de looprollen zitten vangen het moment op de looprollen op en houden tevens de dunwandigen buis rond. De statisch bepaalde rechtgeleiding is vanzelfsprekend zeer licht lopend. De rechtheid van de baan van de slede is hoofdzakelijk bepaald door de



Figuur 10c

evenwijdigheid van de sleuven, die natuurlijk zeer goed kan zijn, en de rolkwaliteit.

Nabeschouwing

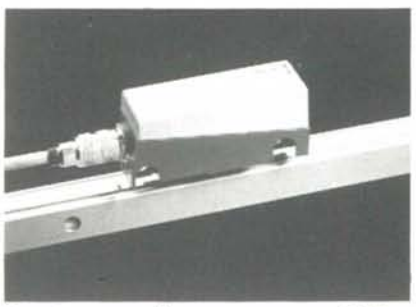
Vaak ziet men toepassingen van rechtgeleidingen waarin het aantal vrijheidsgraden overbepaald is en waarin geen 'zuiver rollen' van de lagers (looprollen) optreedt. Het hebben van een thermisch centrum in een rechtgeleiding kan veel narigheid besparen. Het hiervoor beschreven verhaal geeft de constructeur, toepasser, de gegevens om snel tot dimensionering van zijn/haar rechtgeleiding te komen.

Literatuur

[1] M.P. Koster, P.C.J.N. Rosielle en E.A.G. Reker; Constructies voor het nauwkeurig bewegen en positioneren; Mikroniek 32 (1992) 4 en 5.
[2] Constructieprincipes, Prof.dr.ir. M.P. Koster, TU Eindhoven, dictaat nr.113136

Produktinfo

Nauwkeurig en robuust lineair maatafleessysteem.



Lineaire maatafleessystemen van Philips Industriële Automatisering zijn door fabrikanten van gereedschapsmachines al op grote schaal als standaard geaccepteerd. Dit is vooral te danken aan de grote betrouwbaarheid en lange levensduur waardoor deze systemen zich kenmerken. De bij de maatafleessystemen toegepaste transducers behouden zelfs onder de meest agressieve bedrijfsomstandigheden hun grote nauwkeurigheid en vergen nauwelijks onderhoud. Een belangrijk voordeel is bovendien dat de Philips transducers door hun ruime toleranties gemakkelijk te installeren zijn.

Sinds kort worden de door het Eindhovense bedrijf ontwikkelde lineaire maatafleessystemen op de markt gebracht door StorK Mufac, specialist in onderhoud aan gereedschapsmachines. Met name gaat het hier om het nieuwe systeem LMS 5, gebaseerd op een dynamische transducer van de vijfde generatie. Dit maatafleessysteem beschikt over een standaard interface, waarbij de signalen ten opzichte van elkaar 90° in fase verschoven zijn. Het kan daardoor aan een grote verscheidenheid aan elektronische besturingen worden gekoppeld, zonder dat specifieke aanpassingen nodig zijn. De meetwaardegever heeft geen bewegende delen en is daardoor mechanisch hoog belastbaar (tot 20 g). Het systeem heeft een dynamisch karakter, dat wordt teweeggebracht door nabootsing van een bewegend raster. Hiertoe tast men van een ingebouwde optoscanner continu de fotocellen af, waarop het beeld van de liniaal wordt geprojecteerd.

De moderne elektronica zorgt voor een hoog scheidend vermogen van - naar keuze - 0,5 µm bij 100 m/min of 0,1 µm bij 50 m/min. Een en ander impliceert dat het lineaire maatafleessysteem LMS 5 voor een breed toepassingsgebied inzetbaar is, van conventionele meetsystemen tot geavanceerde CNC-applicaties.

Voor uitvoerige info:
Storc Mufac B.V.
Postbus 2079, 7550 CB Hengelo
Telefoon: 074 - 403 828.
Fax: 074 - 403 899.

Gaslekzoeker met directe uitlezing

DIDEX Nederlands Centrum voor Explosieveiligheid B.V. introduceert in samenwerking met ION Science als eerste een gaslekzoeker die niet verzadigbaar is en waarbij het meetresultaat direct op de display is af te lezen. Hierdoor is het voortaan niet meer nodig om meetresultaten met behulp van tabellen te bepalen.

De gaslekzoeker, "Gas Check" genaamd, is speciaal ontworpen voor het detecteren en meten van zeer kleine tot grotere gaslekkages en concentraties.

De Gas Check reageert op alle gassen die een andere warmtegeleidingscoëfficiënt hebben dan die van lucht. Het instrument is buitengewoon gevoelig; waterstofgas wordt bijvoorbeeld al bij 0,00005 ml/sec gedetecteerd.

De Gas Check kan zowel hoeveelheden lek in ml/sec als concentraties gas in ppm meten.

De reactie- en hersteltijd is 1 seconde.

In de Gas Check wordt van een speciaal ontwikkelde ("Massaloze") meetcel gebruik gemaakt gecombineerd met een microprocessor, beide opgebouwd met behulp van surface mount en hybride techniek. De meetcel is daardoor niet verzadigbaar.

Dankzij deze nieuwe technologieën is het instrument compact, handzaam en makkelijk te bedienen; de gemeten hoeveelheid lek is direct af te lezen.

De Gas Check is uitermate geschikt voor controlewerkzaamheden in de apparatenbouw, laboratoria en de chemische industrie.

Het leveringsprogramma bevat drie modellen, namelijk:

- een basismodel voor niet veeleisende toepassingen;
- een luxe model met uitgebreide instel- en keuzemogelijkheden, zoals "eenheden" ml/sec, ppm, ft^3/yr; gasgroepen (5x); "Peak hold"; achtergrond onderdrukking;
- een explosieveilige uitvoering van het luxe model; ontworpen en gecertificeerd volgens de laatste Europese normen (Cenelec). Deze is speciaal bedoeld voor het uitvoeren van metingen in geclassificeerde ruimten met gasontploffingsgevaar.

Elk instrument wordt compleet geleverd met diverse losse hulpstukken, gereedschappen en een Nederlandstalige handleiding. Het geheel is opgeborgen in een meegeleverde stevige koffer.

Voor uitvoerige info:
DIDEX Nederlands Centrum voor Explosieveiligheid B.V.
Mevrouw C.J. Mettau
Nijverheidstraat 120
2901 AR Cappelle aan den IJssel
Telefoon: 010 - 458 444.

vrije Universiteit *amsterdam*

Hoofd instrumentmakerij m/v

Vacaturenummer 593.2176
De Faculteit der Natuurkunde en Sterrenkunde (ca. 140 formatieplaatsen) heeft een goed toegeruste instrumentmakerij opgebouwd uit drie gekwalificeerde werkgroepen (totaal 23 personen).
Deze zijn direct betrokken bij de technische ontwikkelingen van de onderzoeks- en onderwijsgroepen. De instrumentmakerij beschikt over CNC-bestuurde apparatuur en heeft zojuist een 3D CAD/CAM/CAE-systeem aangeschaft.

De Faculteit der Natuurkunde en Sterrenkunde zoekt een Hoofd Instrumentmakerij m/v die met de nodige dynamiek en slagvaardigheid leiding zal geven aan de instrumentmakerij.

Taak
Geven van leiding aan de instrumentmakerij; beheer en eindverantwoordelijkheid voor de algehele gang van zaken; zorg voor een samenhangend beleid voor wat betreft de werkzaamheden van de drie werkgroepen; verantwoordelijkheid voor de introductie en de implementatie van nieuwe technologieën en het 3D CAD/CAM/CAE-systeem; verantwoordelijkheid voor het financiële en materiële beheer; onderhouden van functionele contacten met het faculteitsbestuur, vakgroepen, commissies, de andere instrumentmakerijen; incidenteel houden van voordrachten; toezicht op een goede naleving van de veiligheidseisen.

Functie-eisen
Niveau HTS werktuigbouwkunde, fijnmechanische techniek of gelijkwaardige opleiding; (grondige) kennis van nieuwe technologieën waaronder CAD/CAM/CAE; ruime ervaring in leidinggevende functie, bij voorkeur in een researchwerkplaats; commercieel en financieel inzicht; kennis van de Engelse en zo mogelijk Duitse taal; zeer goede contactuele eigenschappen en sociale vaardigheden.

Bijzonderheden
Een psychologisch onderzoek kan deel uitmaken van de sollicitatieprocedure.

Aanstelling geschiedt in een tijdelijk dienstverband voor de periode van één jaar. Bij gebleken geschiktheid zal het dienstverband daarna worden omgezet in één voor onbepaalde tijd.

Salaris
Afhankelijk van opleiding en ervaring maximaal *f* 5.627,- bruto per maand (salarisschaal 10), bij volledige werktijd.

Informatie
Nadere informatie wordt gaarne verstrekt door ir. K. van der Lee, secretaris van de faculteit, tel. 020- 548 2465 of bij dr. D.G. de Groot, tel. 020- 548 4713.
Schriftelijke sollicitaties onder vermelding van het vacaturenummer linksboven op brief en envelop, binnen 14 dagen na het verschijnen van deze advertentie, te richten aan de Vrije Universiteit, Secretaris Faculteit der Natuurkunde en Sterrenkunde, De Boelelaan 1081, 1081 HV Amsterdam.

De Vrije Universiteit streeft naar toename van het aantal vrouwen in haar organisatie.
Instemming met de doelstelling van de Vrije Universiteit als christelijke instelling wordt verwacht.
De Vrije Universiteit is gelegen aan de De Boelelaan 1105, Amsterdam-Buitenveldert.

Als U grote plannen heeft, zit U goed met ons lengtemeetsysteem LIDA 205. Steeds als de ARIANE een start volgens het boekje maakt, zijn de mensen van HEIDENHAIN een beetje trots. Want voor de vervaardiging van het rompgedeelte, speelt een LIDA-lengtemeetsysteem een belangrijke rol. Dat komt omdat het open lengtemeetsysteem niet alleen grote nauwkeurigheid levert, maar ook grote lengten kan meten: meetlengten tot en met 30 meter zijn een kleinigheid. Zelfs 90 meter is voor de LIDA nog geen reden om te kapituleren. Dit alles wordt mogelijk gemaakt door een staalband als maatdrager (uit één stuk). Onze LIDA 205 is overigens ook uitstekend geschikt voor meer aardse problemen, zoals het vermeten van vrachtwagens of vliegtuigen.

HEIDENHAIN NEDERLAND B.V.
Landjuweel 20 - 3905 PG Veenendaal
Postbus 107-3900 AC Veenendaal
☎ (08385) 40300 FAX (08385) 17287

HEIDENHAIN