

Mikroniek

VAKBLAD OVER PRECISIETECHNOLOGIE

JAARGANG 40 - NUMMER 5

**5 Kreeg statistiek ooit
een faire kans?**

**10 Mensen maken
precisietechnologie**

**15 Microsysteem-
technologie en
galvanotechniek**

André

15 NOV 2000

**18 Precisiegericht
ontwerpen**

**31 Simulatie
dynamisch gedrag**

Visit our web site:
www.newport.com



Bespaar tijd

Bespaar geld

Behaal uitmuntende resultaten

Welkom bij Newport!



Newport is leverancier van een breed pakket van componenten voor laboratoria toepassingen en R & D voor de industrie en kan in vele gevallen een aanzienlijk deel van uw aanvraag verzorgen. Onze standaard componenten en klantspecifieke producten zijn gebaseerd op geavanceerde precisie- technologieën en verkrijgbaar tegen concurrerende prijzen. Daárom is Newport wereldwijd een gewaardeerd leverancier in vele onderzoekslaboratoria en in de industrie.

Verkrijgbare productlijnen:

- Optiek en optische houders
- Mechanische componenten en subsystemen
- Passieve en actieve trillingsisolatie systemen
- Motion controllers
- Optiek gerelateerde laboratorium instrumenten

Zoek niet langer!

Vraag vandaag nog de gratis Newport catalogus aan.



OEM
spoken here



Newport B.V. – Tiranastraat 25 – NL-3404 CJ IJSSELSTEIN

Telefoon: 030 659 2111 – Telefax: 030 659 2120 – e-mail: netherlands@newport-nl.com

In dit nummer

Vakblad voor precisietechnologie en fijnmechanische techniek en orgaan van de NVPT. Mikroniek geeft actuele informatie over technische ontwikkelingen op het gebied van mechanica, optica en elektronica. Het blad wordt gelezen door functionarissen die verantwoordelijk zijn voor ontwikkeling en fabricage van geavanceerde fijnmechanische apparatuur voor professioneel gebruik, maar ook van consumentenproducten.

Uitgave:

PubliVision BV
Postbus 1738
3000 DR Rotterdam
Telefoon: 010-4081312
Fax: 010-4089222
Email: office@publvision.nl

Uitgever:

Hans Arnold

Advertenties en abonnementen:

PubliVision BV

Abonnementskosten:

Nederland: fl. 110,- per jaar ex BTW
Buitenland: fl. 140,- per jaar ex BTW

Hoofredactie

Dirk Scheper

Redactiesecretariaat

Mikroniek
p/a PubliVision BV

Secretariaat NVPT

Burgemeester Oudlaan 50, kamer 5-33
3062 PA Rotterdam
Postbus 1738
3000 DR Rotterdam
Telefoon: 010-4081776
Telefax: 010-4089039
E-mail: office@nvpt.nl
Internet: www.nvpt.nl

Vormgeving en realisatie:

Twin Design bv, Culemborg

Mikroniek verschijnt zes maal per jaar
© Niets van deze uitgave mag overgenomen of vermenigvuldigd worden zonder nadrukkelijke toestemming van de redactie.

ISSN 0026-3699

4 Editorial

5 Kreeg de statistiek ooit een faire kans?

Statistiek is een vak waarin eens en te meer blijkt dat theorie en praktijk soms ver uit elkaar liggen. Of wordt dit verkeerd geïnterpreteerd?

10 Mensen maken precisietechnologie

Dat mensen precisietechnologie maken blijkt duidelijk als we op bezoek gaan bij Delba in Duiven. Hier een verslag.



15 Microsysteemtechnologie en galvanotechniek

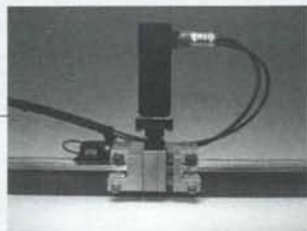
Miniaturisatie is een trend waarmee alles kleiner, lichter en goedkoper moet worden gemaakt. Dat we hier tegen grenzen oplopen als gevolg van de maakbaarheid van het product en de precisie die wordt gevraagd, wordt steeds meer zichtbaar.

17 Motioncontroller

Het vervolg van de Motioncontroller uit nummer 4 van Mikroniek.

18 Precisiegericht ontwerpen: status en trends

In een tweetal artikelen wordt ingegaan op het precisiegericht ontwerpen. Het betreft hier een uitgebreid uittreksel uit de CIRP-annalen, dat zeer veel informatie bevat over dit vakgebied.



31 Simulatie van het dynamisch gedrag

Simulatie van gedragingen geven een goed inzicht in het werkelijk gedrag, maar essentieel is wel het model dat gebruikt wordt.

Het gaat goed met het IOP Precisietechnologie, gaat het ook goed met de precisietechnologie?

Het gaat goed met het IOP Precisietechnologie, dank u! We hebben na de succesvolle Open Dag in september '99 zo'n 37 verkorte projectvoorstellen gekregen. Na een gedegen selectieprocedure zijn uiteindelijk 8 voorstellen gehonoreerd. Dat betekent dat er in de loop van dit najaar 12 promovendi aan de slag kunnen met onderwerpen, die van belang zijn voor de Nederlandse industrie. Op 14 september is er een Startsymposium gehouden in Ede, waarbij u met die projecten hebt kunnen kennismaken.

Gaat het nu ook goed met de precisietechnologie in Nederland? Met het antwoord op deze vraag moeten we iets terughoudender zijn. Met de bedrijven gaat het prima, dat kunt u in de krant lezen. U kunt echter ook lezen dat er een toenemend tekort aan technisch geschoold personeel is. Voor de precisietechnologie betekent dit een tekort aan fabricagetechnologen. Maar nog nijpender is het tekort aan ontwerpers in het algemeen, en van mechatronisch ontwerpers in het bijzonder. Dit geldt zowel voor ontwerpers van producten, als voor die van productiemiddelen.

Dit tekort aan ontwerpers is deels een gevolg van de economische hausse, maar het heeft ook belangrijke structurele oorzaken. Flip Doorschot constateerde op deze plaats, dat de universiteiten de constructieve en productiewetenschappen 'tot op de grond toe' hebben afgebroken. De visitatiecommissie Troost schreef begin dit jaar in haar rapport 'Uitzicht' dat de invoering van integraal ontwerpen in het HBO een belangrijk punt van zorg is. Inmiddels zijn er tekenen die op verbetering wijzen, maar de situatie is nog steeds onbevredigend, en zal in het gunstigste geval slechts langzaam verbeteren.

Het gevolg is dat jonge ingenieurs met talent voor ontwerpen het vak voor een belangrijk deel in de praktijk moeten leren. Philips heeft dit probleem onderkend, en speelt erop in door jonge ontwerp-ingenieurs een tweejarige 'Master class' te laten doorlopen, waarin coaching door ervaren ontwerpers een grote rol speelt. Het bedrijfsleven begint aldus zelf zijn ingenieurs op te leiden. In de gegeven situatie lijkt dit een goede weg om te gaan, mits de kosten in de hand kunnen worden gehouden.

Het IOP Precisietechnologie overweegt om een initiatief te ondersteunen, waarin jonge ontwerpers, die al in dienst zijn van een bedrijf, een meerjarig coaching/begeleidingsprogramma te laten doorlopen, waardoor een versnelde ervaringsopbouw plaats vindt. Dit programma moet dan gericht zijn op (en betaalbaar zijn voor) *alle* geïnteresseerde bedrijven in de sector. Gebruik makend van beschikbare ervaringen, uiteraard. Als u interesse hebt, gelieve u contact op te nemen met mij of met de secretaris van dit IOP, Casper Langerak (070-361 0312).

Lou Hulst,
voorzitter IOP Precisietechnologie (040-295 2605).

Kreeg de statistiek ooit een faire kans?

Een van de leukste vakken waarmee ik in het verleden kennismakte is, zonder enige twijfel, de statistiek geweest. De manier waarop dat plaatsvond is van belang voor het vervolg, vandaar hierover een korte uitleg.

In een winkel voor tweedehands boeken vond ik een eenvoudig statistiekboekje (voor twee kwartjes werd ik de eigenaar, toen een vermogen). De vorige eigenaar had in het boekje een aantal aantekeningen gemaakt die het lezen sterk stimuleerden. Kennelijk werkte hij bij het SBB, de voorloper van de huidige DSM en hij had geprobeerd om de metingen die op het SBB plaatsvonden met de statistiek uit het boekje te bewerken. Dat gebeurde op een praktische manier zodat je niet verzoop in een getallenbrij. Zijn opmerkingen in de trand van "theoretisch gezwets" en "ook dat klopt weer niet met de feiten" zorgden voor veel leesgenot, maar het maakte je ook alert op het verschil tussen theorie en praktijk. In de tijd waarover ik nu spreek (1957) bestonden er nog geen zakjapanners alles ging met de hand of met de rekenliniaal en helaas kon je met de rekenliniaal niet optellen en aftrekken dus dat moest met de hand. En u raadt het waarschijnlijk al, hier zaten alle fouten die de man gemaakt had, helaas. Zijn conclusies waren over het algemeen wel correct. Maar van zijn aanpak heb ik veel geleerd, hierop kom ik straks terug.

Theorie en praktijk

Uiteraard zit er een verschil tussen de theorie en de praktijk daar de theorie uit mag gaan van geïdealiseerde toestanden die in de praktijk niet voorkomen. Mijn eerste confrontatie hiermee liep via de statistiek, daarom hier even een anekdote.

In mijn praktijkjaar raak ik betrokken bij een bedrijf waar men glazen ringetje maakt. Men koopt buisglas in en via het proces van het afspringen maakt men hiervan ringen van de gewenste

lengte, een proces dat zeer goed werkt. De ringen worden rechtop in een normaalbak gezet, als je dan in de bak kijkt zie je een mooi patroon van allemaal cirkeltjes. Deze ringen moeten gekeurd worden door de kwaliteitsdienst. De keurmeester heeft men opgedragen om aselekt 100 ringen uit de bak te nemen en te meten. De ringen kunnen de volgende fouten hebben: te lang, te kort, scheef, stukjes uit de rand. Uit de berichtgeving van de keurmeester zie ik dat hij een uitvalpercentage meet van 5%, echter dat kan niet gezien het proces. Maar ook het aantal storingen dat een gevolg zou moeten zijn van die 5% is zo groot dat dat zou moeten leiden tot een wagon vol afval. Deze wagon kan ik echter niet vinden. Ik besluit om met de keurmeester te gaan praten en meteen blijkt dat ik de eerste ben die hem überhaupt iets vraagt. Nog nooit heeft iemand aan de man gevraagd wat hij doet! De man is dolblij dat hij eindelijk aan iemand zijn bijdrage mag tonen, en doet dat ook vol overgave. Hij is duidelijk trots op zijn werk en vindt dat hij ook belangrijk werk doet, terecht.

Op mijn vraag hoe hij een aselechte trekking doet blijkt het volgende (hij demonstreert het wederom vol overgave). Hij pakt de normaalbak en kijkt er schuin overheen. Door het mooie patroon kan hij alle defectieven (dus te lang, te kort scheef en stukjes uit de rand) zó zien. Hij pakt deze er allemaal uit en telt dan aan tot 100 en hij vertelt me dat de gevonden defectieven nu ook meteen het percentage aangeven, slim toch!

Op mijn vraag waarom hij nog doortelt tot 100 wordt hij verlegen. Dat hoeft eigenlijk niet merkt hij op.

Wat men duidelijk verzuimd heeft is om deze enthousiaste man uit te leggen wat aselekt is. Als ik hem dat uitleg krijgt hij een probleem, namelijk de defectieven die hij betrokken heeft op 100 moeten betrokken worden op 4000 zijnde het aantal ringen dat in de bak zit, of anders gezegd het percentage wordt $1/400$ deel van 5%. In de grafiek die hij bijhoudt loopt een mooie lijn midden over het papier met erbij 5%. Gaat hij nu het echte getal invullen dan valt de lijn naar de nul en komt daar nog nauwelijks bovenuit. We besluiten om dat toch maar te doen en de reactie van de organisatie is ongelooflijk, er gebeurt namelijk helemaal niks. Men had nog nooit naar de mooie grafiek gekeken en deed dat nu ook niet. Op het eind van de maand is de grafiek vol. We hebben

toen de schalen aangepast en het lijntje liep weer prachtig in het midden van de grafiek, dus geen enkel probleem voor onze keurmeester.

Dilemma

De grote vraag die nu opkomt is hoe het nu verder moet, moet de controleur nu echt aselechte trekkingen gaan uitvoeren? In dat geval laat hij bewust defectieven door. Of moeten we hem uitleggen dat hij alle defectieven eruit moet halen maar het aantal wel betrekken op de totale populatie van 4000? In dat laatste geval zal hij terecht vragen of we misschien hardstikke gek zijn geworden, want waarom passen we dan nog statistiek toe.

En nu zijn we bij de discussie die eindelijk eens gevoerd zou moeten worden tussen de technici en onze statistische vakbroeders.

In dit geval is het natuurlijk helemaal duidelijk wat het advies moet zijn, natuurlijk alle defectieven eruit halen, het kost nauwelijks iets meer en het voorkomt problemen verderop. Maar in de meeste gevallen ligt de zaak niet zo eenvoudig. Als men het gemiddelde en de spreiding meet, en deze liggen binnen de voorschriften, dan weet men dat men defectieven doorstuurt maar men is niet in staat om ze er uit te halen tegen aanvaardbare kosten. De statistiek is "slechts" in staat om de maximale omvang van de ellende aan te geven, maar de techniek zal moeten aangeven of er überhaupt wel ellende optreedt tengevolge van het doorlaten van defectieven. En dat zag ik nooit gebeuren, een beperkt aantal uitzonderingen daargelaten. Wat weet de techniek over de stoorgevoeligheid van de apparatuur? En wat weet de techniek eigenlijk over de oorzaken die achter de storingen zitten? Het een en ander vertaalt zich in het aan halen van toleranties, zonder dat men weet wat men doet.

Men kan aan de storingen van machines en gereedschappen gaan meten en in het verleden heb ik dat ook gedaan. Door gebruik te maken van het geleerde uit het voornoemde boekje kom je er dan achter dat de statistische verdeling van de gemeten standtallen niet symmetrisch is (voor de liefhebber, het is een Weibullverdeling). Dat kan je heel eenvoudig controleren door van de gemeten standtallen een histogram te maken, dat leerde ik uit dat boekje. Maar dat was toen nog nooit gebeurd in de organisatie waar ik nu over spreek.

Natuurlijk is er ook een relatie tussen toleranties en de functionele werking van een produkt. Soms is die heel eenvoudig, maar in de meeste gevallen zo gecompliceerd dat men weer vlucht in het aanhalen van de toleranties zonder die relatie echt te leggen. En wie moet die relatie dan leggen, juist de techniek!

Processen

Het is goed om een onderscheid te maken tussen:

Statistische processen;

Technische processen en;

Gecombineerd technisch statistisch processen.

We zullen een voorbeeld geven van een statistisch proces en van een gecombineerd technisch statistisch proces. Overigens is het

de vraag of statistische processen wel sec bestaan, we zullen daar niet op ingaan. Het voorbeeld dat ik geef van een statistisch proces komt in ieder geval wel in de buurt.

Een statistisch proces

Stel we hebben een schietwedstrijd, er wordt geschoten op kaarten die een X-Y assenkruis bevatten, de gebruikte geweren zijn zuiver en hebben geen afwijking. De bedoeling is om de kaart in het kruispunt van de X-as/Y-as te raken. We nemen aan dat de afwijkingen die in de X-richting optreden niet samenhangen met de afwijkingen die in de Y-richting optreden (d.w.z. dat ze niet gecorreleerd zijn). Tevens nemen we aan dat het niets uitmaakt als we de schietkaart in de ruimte verdraaien, de resultaten zullen er niet door beïnvloed worden. Het blijkt dat men met deze aannamen plus een aantal triviale statistische aannamen de waarschijnlijkheidsfuncties kan uitrekenen en we vinden zoals te verwachten was de bekende e-macht. We zien hier dus een statistisch proces en het zal duidelijk zijn dat als men de metingen (of schoten) na afloop gaat verwerken dat ze met Gauss-statistiek te beschrijven zijn, zo is het ook opgezet.

Een gecombineerd technisch statistisch proces

We zullen voor dit proces het draaiproces kiezen. Stel we moeten assen draaien met een diameter van 10 mm en een tolerantie van $\pm 0,05$. We kunnen dan een controlekaart maken en daarop de afkeurgrenzen aangeven. Een voorbeeld is de draaibewerking. Als men gaat draaien, dan zal de beitel afslijten en dus worden de asjes in de loop van de tijd dikker. Een ervaren draaier weet dat natuurlijk en dus zal hij zo dicht mogelijk beginnen bij de – tolerantie. (zie lijn A). Volgen we nu de diameter in de tijd dan zien we dat die alsnog groter wordt (de rechte lijn in het diagram). Door een aantal toevallige oorzaken wordt deze lijn niet echt gevolgd en ontstaat de wiebellijn rondom de rechte.

Bij A moet de draaier de beitel vervangen en het zou een groot wonder zijn als hij de instelling hetzelfde zou krijgen als bij lijn A. Bij B wordt gestart en hetzelfde proces als bij lijn A treedt weer op en zo ontstaat B en daarna uiteraard lijn C enzovoort. De ontstane producten gooien we in een normaalbak die we flink door elkaar husselen (we noemen dat netjes "aselect trekken"). Van de getrokken producten wordt de diameter gemeten en van de gevonden waarden wordt het gemiddelde en de spreiding berekend. Het zal duidelijk zijn dat deze waarden niets zeggen over het opgetreden proces, het verloop van het proces zien we in de grafiek. Deze waarden zeggen alleen maar iets over de manier waarop wij naar het proces kijken.

Men kan zich zelfs afvragen of we überhaupt iets hebben aan deze gegevens. Want impliciet hebben we bij het berekenen van het gemiddelde en de spreiding aangenomen dat we van doen hebben met een normale verdeling, althans zo worden de resultaten over het algemeen geïnterpreteerd. In de figuur hebben we aangenomen dat de slijtage lineair met de tijd verloopt, dat klopt ook wel in grote lijnen. Bij het aselekt trekken gooien we in feite de informatie over het tijdverloop weg. In dit geval (lineair) kan

men eenvoudig inzien dat we van doen moeten hebben met een uniforme verdeling, je projecteert bij het aselekt trekken de lineaire lijn op de verticale as. Het een en ander is eenvoudig te simuleren met het programma Excel.

Men kan natuurlijk ook andere slijtagemechanismen uitproberen, b.v. in het begin of bij het eind van de levensduur van de beitel meer of minder slijtage invoeren. Maar wat men ook doet de verdeling van de diameter wordt geen "normale". Het zou mogelijk zijn om uit te rekenen hoe het slijtageverloop zou moeten zijn om tot een normale verdeling te komen, we zullen dat niet doen want het is onzinnig. Ik kom nu nog even terug op het genoemde boek in de inleiding. Ook daar bleek telkens weer dat de verdelingen met de beste wil van de wereld niet normaal te verklaren waren.

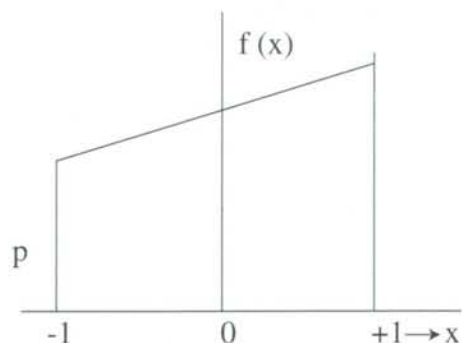
En wat we nu hebben afgeleid voor het draaien, geldt voor zeer veel technische processen zoals:

Boren;
Frezen;
Schaven;
Ponsen;
Buigen;
Extruderen;
Dieptrekken;

Enzovoort.

Gevolgen

Men kan zich nu afvragen wat het betekent als men b.v. een rechthoekige verdeling interpreteert als een normale verdeling. We zullen het wat algemener doen en uitgaan van een trapeziumvormige verdeling, het een en ander ziet men in onderstaande figuur. Het is goed om u te realiseren dat het oppervlak onder de schuine lijn gelijk is aan 1. Immers de kans dat de gemeten grootte ligt tussen -1 en +1 is 1



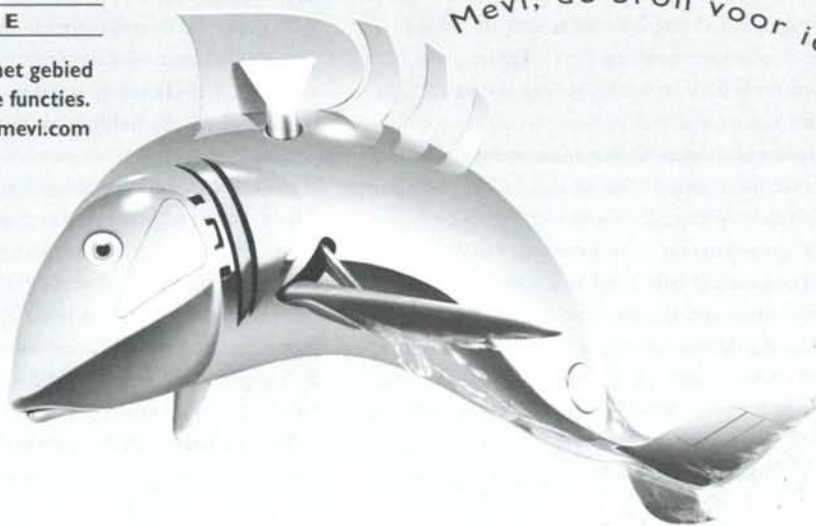
Voor $p=0.5$ hebben we de rechthoekige of uniforme verdeling.

Mevi

**FIJNMECHANISCHE
INDUSTRIE**

Het neusje van de zalm op het gebied
van prototypes en complete functies.
Voor meer info: <http://www.mevi.com>

Mevi, de bron voor iets nieuws



Weth. den Oudenstraat 1, 5706 ST Helmond,
telefoon 0492 53 86 15, fax 0492 53 87 35, e-mail info@mevi.com



De rechte lijn kunnen we weergeven met de formule

$$f(x) = \left(\frac{1}{2} - p\right) \cdot x + \frac{1}{2}$$

Uitgaande van de normale definities voor het gemiddelde en de spreiding kunnen we dan afleiden:

Voor het gemiddelde $\mu = \frac{1}{3} - \frac{2}{3} \cdot p$

Voor de spreiding $\sigma = \left(\frac{2}{9} + \frac{4}{9} \cdot p - \frac{4}{9} p^2\right)^{\frac{1}{2}}$

Voor $p=0,5$ vinden we:

$$f(x)=0,5; \quad \mu=0 \quad \sigma = \frac{1}{3} \sqrt{3} = 0,57735...$$

Uiteraard kan men dit ook uit de uniforme verdeling rechtstreeks afleiden. Met de gevolgde methode krijgt u echter een klasse van problemen aangereikt die u allemaal zelf kunt verifiëren.

Bij de statistische procescontrole (SPC) maakt men gebruik van het begrip C_p .

De C_p is gedefinieerd als:

$$C_p = \frac{ULS - LSL}{6\sigma}$$

ULS=Upper Specification Limit (bovenste afkeurgrens)
LSL=Lower Specification Limit (onderste afkeurgrens)

Leggen we nu ULS op +1 en LSL op -1, dan geldt voor de Uniforme verdeling: $C_p=1$ en voor de Normale verdeling:

$$C_p = \frac{1 - (-1)}{6 \cdot \frac{1}{3} \sqrt{3}} = \frac{1}{3} \sqrt{3} = 0,577$$

Wat we nu zien is, wat men had kunnen verwachten, de echte C_p is 1, en we vinden met de normale verdeling 0,577. Dit betekent dat we ons slechter voordoet dan we in werkelijkheid zijn en dat lijkt me oerdom. Uiteraard kan men nu ook nagaan wat dit betekent voor al de andere grootheden van SPC. We zullen dat niet doen daar de grootheden elke theoretische basis missen en het veel beter zou zijn om te streven naar echte criteria gesteund vanuit de techniek. Ik kom nu weer even terug op de keurmeester van de glasbuisjes. In de afgelopen drie jaar heb ik bij producties gevraagd naar het feit of ze SPC toepasten, ik vroeg dat dan aan technici. Als er dan instemmend werd geknikt vroeg ik of ik in hun database mocht kijken. En geloof het of niet, niemand was in staat om de database aan de praat te krijgen. Men beloofde mij dat ze met hun statistische collega zouden overleggen en mij de gevraagde gegevens zo snel mogelijk zouden toesturen. Tot op heden moet ik de gegevens nog krijgen, echter wat mij betreft kunnen ze ze houden daar ze waarschijnlijk toch onbruikbaar zijn! Een groot aantal keren is me in het verleden gebleken dat men vaak een brievenbus bouwt waar men wel gegevens in kan stoppen, maar waar het vrijwel onmogelijk is om er ook maar iets uit te krijgen. Kennelijk vraagt er niemand naar, en we zijn weer terug bij de keurmeester. Met zijn gegevens werd ook niets gedaan.

Het zou wenselijk zijn dat de technici probeerden te achterhalen hoe de technische processen zich in de tijd gedragen en gewaagd met deze gegevens advies zouden vragen aan de statistici hoe ze op grond van deze gegevens het beste een statistische controle zouden kunnen uitvoeren. Dat zal beter werken dan dat men als een kip zonder kop achter Taguchi of Keki Bothe aan gaat rennen. Zij gaan er ook impliciet vanuit dat grootheden normaal verdeeld zijn.

Correlatie en regressie

De betekenis van de correlatiecoëfficiënt

In de statistiek heeft men de correlatiecoëfficiënt r gedefinieerd, waarmee men kan bepalen hoe sterk twee grootheden statistisch met elkaar samenhangen. Let op dat hier weer het woord statistisch staat. We zullen proberen duidelijk te maken wat hiermee bedoeld wordt. Voor het berekenen van de correlatiecoëfficiënt wordt verwezen naar de literatuur die hier in ruime mate over bestaat. Tussen gebeurtenissen kan een verband bestaan, denk bijvoorbeeld aan het opendraaien van een kraan en de kracht waarmee het water uit de kraan stroomt. Er is een verband tussen de stand van de kraan en de kracht van het stromende water. Alle fysische functies geven zo'n verband tussen grootheden. En we zijn er ook gewend aan geraakt dat deze verbanden er zijn, we vinden het vreemd als het eens een keer niet opgaat.

Tussen grootheden kan evenwel ook een correlatie bestaan die we netjes uit kunnen rekenen. De fout die er nu regelmatig wordt gemaakt is dat men hoge correlatie verwacht met een verband. Er zijn twee gebruikelijke misvattingen omtrent de betekenis van de correlatie. **Een ervan stelt de woorden: "geen correlatie tussen" gelijk met de woorden "zonder verband". De tweede gebruikelijke misvatting stelt correlatie gelijk met causaliteit.**

We kunnen dit in een zin tot uitdrukking brengen met: **Als twee grootheden met elkaar gecorreleerd zijn dan hoeven ze geen verband met elkaar te hebben, en als twee grootheden verband met elkaar hebben hoeven ze niet gecorreleerd te zijn.**

Nu lijkt dat allemaal wat academisch, maar dat is het niet. In de fysica spelen de processen zich af in de tijd en dit is waarschijnlijk een pleonasme. Zonder tijd zouden we niet in staat zijn om verandering waar te nemen. Stel nu dat we twee grootheden hebben die lineair toenemen in de tijd, maar ze hebben verder niets met elkaar te maken. Zetten we deze twee grootheden uit in een X-Y grafiek dan zal het lijken alsof ze met elkaar te maken hebben en de correlatiecoëfficiënt kan heel hoog zijn. Wat we in feite hebben gedaan is de tijd geëlimineerd (zie afbeelding). Overigens maak ik nu de fout die ik onder het hoofdje regressie nog zal toelichten, namelijk zowel in de X als in de Y zit een statistische component en dan mag men zo de regressie niet berekenen. In het mathematische programma Matcad zit een procedure waarmee het wel kan, we gaan hier niet verder op in. Men kan zo de meest zotte onzin-verbanden vinden die helaas door nogal wat mensen serieus genomen worden en dan bedoel ik nu niet alleen politici.

Gevaren van de regressieanalyse

Direct in het verlengde van de correlatiecoëfficiënt ligt de regressieanalyse. In feite werken de gebruikelijke regressieanalyses met univariate reeksen. Dat wil zeggen dat de gegevens in de X-coördinaat geen statistische component bevatten. De getallen die daar staan zijn absoluut, denk b.v. aan jaartallen, daarin kan natuurlijk geen spreiding zitten. Dat rechtvaardigt dat men de som van de kwadraten van de afwijkingen in de Y-richting gaat minimaliseren. Echter, meestal bevat zowel de X-coördinaat als de Y-coördinaat een statistische component, en in dat geval gaat de gebruikelijke regressieanalyse niet meer op (zie voren).

Hieruit zien we dat het maken van een regressielijn tegenwoordig met de computer snel te doen is, maar over het algemeen meer verwarring zaait dan dat men er iets aan heeft.

Als we nu kijken naar statistische proefopzetten, c.q. naar Taguchi programma's (in wezen is dat hetzelfde), dan zien we dat er in de berekeningen gezocht wordt naar regressielijnen die de metingen goed "fitten". Men beoordeelt dat aan de hand van de correlatiecoëfficiënt. En nu zijn we weer terug bij het vorige hoofdstuk. Dus ook hier merk ik weer op: **Als twee grootheden met elkaar gecorreleerd zijn dan hoeven ze geen verband met elkaar te hebben, en als twee grootheden verband met elkaar hebben hoeven ze niet gecorreleerd te zijn.** Overigens wil dit niet zeggen dat het zinloos is om met statistische methoden onderzoek te

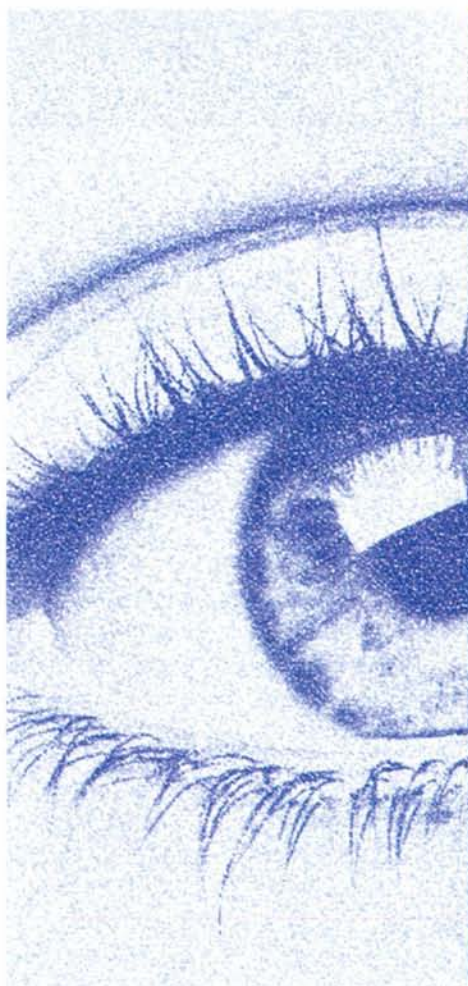
doen, het kan best wat opleveren. Wat we moeten bedenken is dat een behaald resultaat meer afhangt van de virtuositeit waarmee men een bepaald tool hanteert, dan van het tool zelf.

Slot

Statistiek, toegepast in de techniek, kan als controlerende functie soms nuttig zijn als het goed wordt toegepast. Er zijn een paar dingen waaraan u moet denken, dat zag ik regelmatig mis gaan:

1. Statistische technieken veronderstellen meestal impliciet dat er normale verdelingen in het spel zijn.
2. Gemeten grootheden in een productie vertonen zelden of nooit een normale verdeling. Vaak zijn er ten gevolge van slijtage, tijdeffecten in het spel.
3. Fysische processen, maar ook andere processen, zijn niet te beschrijven met statistische functies.
4. Tussen grootheden die gecorreleerd zijn bestaat zelden een verband. De correlatie ontstaat via tijdeffecten.
5. De normale regressieanalyse gaat slechts op voor univariate reeksen. Dit wil zeggen dat de X-as absolute waarden bevat en in de waarden op de Y-as een statistische component zit.

Eens besprak ik deze lijst, met een deskundig leider van een groot statistisch bureau. Aan het slot merkte hij het volgende op, "wij houden de statistiek kunstmatig moeilijk, anders zijn we ons werk kwijt". Sprak hier de statistiek voor de eerste keer de waarheid? Voor een aantal goede collega's hoop ik dat dit niet waar is!



**Sensoren
vision systemen &
meetinstrumenten
van
keyence & di-soric**

Van Essen Sensors
(015) 275 51 00
sensors@vanessen.com

Op bezoek bij Delba in Duiven

Tonny Peters is directeur en eigenaar van twee bedrijven in één gebouw. Delba Special Carbide Products bv maakt hoogwaardige precisieproducten in kleine series voor de verpakings- en genotmiddelenindustrie. Delba Precisie Techniek bv importeert en verkoopt dezelfde slijp- en vonkersiemachines die het zusterbedrijf gebruikt om die precisieproducten te vervaardigen. Die combinatie van toepassen en verkopen maakt dat klanten van beide bedrijven maximaal profiteren van de expertise die in huis is.

Tonny Peters (afbeelding 1) is met vallen en opstaan groot gegroeid in het vak precisietechnologie, en kent daarom als geen ander het belang van een goede praktijkgerichte opleiding. Aangezien vooral in het oosten van het land praktijkopleidingen in precisietechnologie ontbreken, heeft hij zelf het voortouw genomen bij het vormen van jonge medewerkers. Lees hierna hoe idealisme en pragmatisme hebben geleid tot een gezond precisietechnologisch bedrijf met ruim twintig medewerkers.

Van spruiten naar precisie

Een gezin met zeven kinderen en een marginaal inkomen uit een tuinderij zijn niet de meest ideale startcondities voor een flitsende opleiding. Dus werkt Tonny als tiener in het familiebedrijf en



Mensen maken precisie

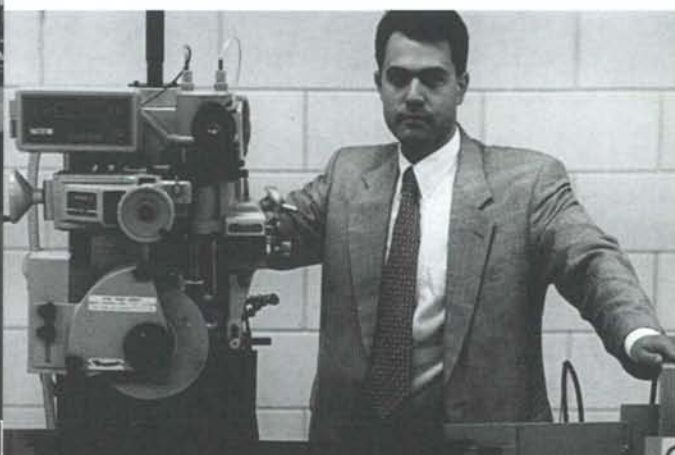
maakt gigantische hoeveelheden spruiten schoon. Dat is weliswaar een precies werkje maar toch niet te vergelijken met de precisietechnologie van het hedendaagse Delba.

Maar het bloed kruipt waar het niet gaan kan en de twaalfjarige Tonny slaagt erin terecht te komen op de schoolbanken van de LTS in Zevenaar. Een paar jaar later wordt hij bankwerker bij een klein metaalbewerkingsbedrijf in dezelfde plaats. Hij volgt avondschool en allerlei cursussen en brengt het zo tot tweede man in het bedrijf. Hij raakt vertrouwd met diamant, hardmetaal, keramiek en numerieke besturing, maar vindt toch dat hij in deze job zijn creativiteit niet voldoende tot zijn recht kan laten komen. Met diploma's in marketing en management lijkt hij toe te zijn aan een eigen bedrijf, maar

ambtelijke bureaucratie verhindert dat. De voor een jonge starter wettelijk verplichte leerstof zit nog niet tussen zijn oren.

Maar met medewerking van de SER en de Kamer van Koophandel in Zutphen weet hij vrijstelling te verkrijgen voor de toen geldende vestigingseisen, zodat in 1986 in Didam de firma Delba van start gaat. Een prangende vraag: "Wat betekent de naam Delba?" Tonny's antwoord: "Mijn vrouw heeft dat bedacht. Het zijn de beginletters van de namen van mijn kinderen."

De productiemiddelen van het prille Delba zijn een freesbank, een slijpmachine, een oven en soldeer- en lasapparatuur. Dat alles staat weliswaar in een garage en de administratie wordt gedaan



Afb. 1: Tony Peters bij het nieuwe pand van Delba in Duiven.

Afb. 2: Eef Hooijboom in de werkplaats.

Afb. 3: Carla van Mil bespreekt de productie van een onderdeel voor een meetmachine (rechts op de foto) van Schut Geometrische Meettechniek in Groningen.

Afb. 4: Maarten Janssen bij een slijpmachine van Okamoto.

technologie

op een bureau naast het echtelijk bed, maar desondanks maakt dit beperkte maar redelijk volledige machinepark het mogelijk complete metaalproducten te maken en te leveren.

Tonny en zijn groeiend aantal medewerkers specialiseren zich in precisieproducten van gesinterd snelstaal en hardmetaal. Hij doet aan intensief bedrijfsbezoek met het doel zijn expertise te delen en en passant orders binnen te halen. Want de introductie van hardmetaal voor allerlei industrieel gereedschap geeft in veel gevallen een behoorlijke verlenging van de standtijd.

In 1997 verhuist het bedrijf naar Duiven, waar een fabriekshal ter beschikking komt waarin al eerder precisieproducten werden

gefabriceerd, zie afbeelding 1. Dus is er een fundering die het mogelijk maakt machines trillingsvrij op te stellen. Ook klimaatbeheersing met een temperatuurstabiliteit van $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ en een rondpompsysteem voor koelvloeistof met temperatuurregeling vormen de ideale randvoorwaarden voor een in precisietechnologie gespecialiseerd bedrijf.

Bij de start van het nieuwe millennium is het aantal medewerkers gegroeid tot 22 en is ook de organisatie gestroomlijnd. Want Tonny Peters heeft veel van zijn taken gedelegeerd aan directeur Eef Hooijboom en verkoopleiders Carla van Mil - voor Delba Special Carbide Products - en Maarten Janssen - voor de machines van Delba Precisie Techniek, zie afbeeldingen 2, 3 en 4.



Alleenvertegenwoordiging van precisiemachines

Min of meer bij toeval ontstond de commerciële poot van Delba voor de verkoop van metaalbewerkingsmachines en bijbehorende hulpmiddelen. Slijpen gaat uiteraard niet zonder slijpstenen en Tonny ondervond dat het niet altijd mogelijk is slijpmachine en gereedschap optimaal op elkaar af te stemmen. Zo ontstond er contact met de Oostenrijks-Zwitserse firma Rappold, die samen met Delba speciale slijpstenen met diamant ging ontwikkelen. Logisch gevolg was dat Delba die slijpstenen en andere Rappold-producten ging verkopen. Tegenwoordig behoren ook magnetische spanplaten en ander opspangereedschap van het Duitse SAV tot het Delba-gereedschapprogramma.

Als het gaat om slijpen en draadvonken kan iedere vakman moeiteeloos een aantal namen van gerenommeerde Europese fabrikanten opnoemen. Tonny ontdekte dat enkele fabrikanten uit het Verre Oosten in onze verspaningswereld een – volgens hem ten onrechte – onbekende naam hebben, maar wel slijp- en vonkmachines leveren met een veel gunstiger verhouding van prestatie en prijs.

Het Japanse Okamoto voert een uitgebreid programma vlak-, rond- en profielslijpmachines, al dan niet met NC- of CNC-besturing van Fanuc. De besturing kan in veel gevallen tot op tienden van micrometers worden ingesteld, zodat – mede door de stijve framebouw en de hydraulische sleden en de stabiele spindels – bewerkingsnauwkeurigheden van een micrometer geen wezenlijk probleem vormen. Met Okamoto CNC-slijpmachines heeft Delba Special Carbide Products onder andere voor een bedrijf in Australië precisieproducten gemaakt met een tolerantie van niet meer dan 2 µm.

Een ander interessant programma vormen de draadvonkmachines van Brother, dat in dit land meer bekendheid geniet door zijn naaimachines en printers. Tonny Peters heeft ondervonden dat de CNC-draadvonkmachines van Brother de slijpmachines van Okamoto uitstekend aanvullen.

Draadvonken kan niet zonder een goede start. Daarom is het niet meer dan logisch dat Delba Precisie Techniek ook startgaten-zinkvonkmachines kan leveren. Dat zijn machines van het Taiwanese fabrikaat Joemars, die uiteraard ook bruikbaar zijn voor het “gewone” zinkvonken. Joemars levert ook CNC-zinkvonkmachines met Heidenhain-besturing.



Afb. 5: De werkruimte van Delba.

Afb. 6: Nancy Huygen.

Afb. 7: Herman Steunenbergh.

Afb. 8: Door Delba geproduceerde snijmesses voor verpakkingsmachines.

Afb. 9: De bevestigingsstrip met details voor de meetmachine van Schut (afbeelding 10).

Afb. 10: De Meet 400 van Schut.

Afb. 11: Een CAD-tekening van een zgn. U-mes.

Opleiden in techniek

Jonge mensen kiezen na de basisschool meestal voor een onderwijsroute die leidt tot een “zittend beroep”, want de kansen op een hoog salarisniveau worden voor een baan in de bank-, verzekerings- of marketingwereld beslist hoger aangeslagen. Maar weinigen beseffen dat een technische job heel leuk kan zijn en ook nog uitzicht biedt op een concurrerend inkomen. Volgens Peters zou bij de beroepskeuze bevrediging in het werk vaker het uitgangspunt moeten zijn. Daarom werkt hij enthousiast mee aan programma's in het kader van de landelijke actie Kies Techniek. “Samen met collega's hoogwaardige precisieproducten maken is een interessante en creatieve uitdaging, die toch meer bevrediging moet geven dan de hele dag vanuit je stoel naar een beeldscherm turen”.

Jonge mensen begeleiden in hun technische opleiding is voor Tonny Peters niet alleen een heilige roeping maar ook een keiharde noodzaak. Want ook in de toekomst wil Delba kunnen beschikken over goede vakmensen, en die moeten vandaag de dag met een lantaartje worden gezocht op de overspannen arbeidsmarkt. Daarom zie je op de “werkvloer” van Delba nogal wat jongeren die bewust voor techniek hebben gekozen en in het bedrijf praktische ervaring opdoen. Dat heeft ook een gezonde wettelijke basis, want met twee medewerkers met MTS-leerbevoegdheid is Delba een erkend leerbedrijf.

Wat meteen opvalt als je de werkplaats, zie afbeelding 5, binnenkomt, is dat er bij Delba ook meisjes in opleiding zijn. Nancy Huygen, bijvoorbeeld, koos aanvankelijk voor een baan in de verzorging maar staat nu achter een kapitale CNC-vlakprofielslijpbank van Okamoto, zie afbeelding 6. Het dresen van een slijpsteen met diamantgereedschap heeft voor haar geen geheimen meer en ook het programmeren van de machine gaat haar goed af. Spijt heeft ze niet van de keuze voor techniek. “Het is bepaald geen zwaar of vuil werk, wat mensen vaak denken van een baan



7

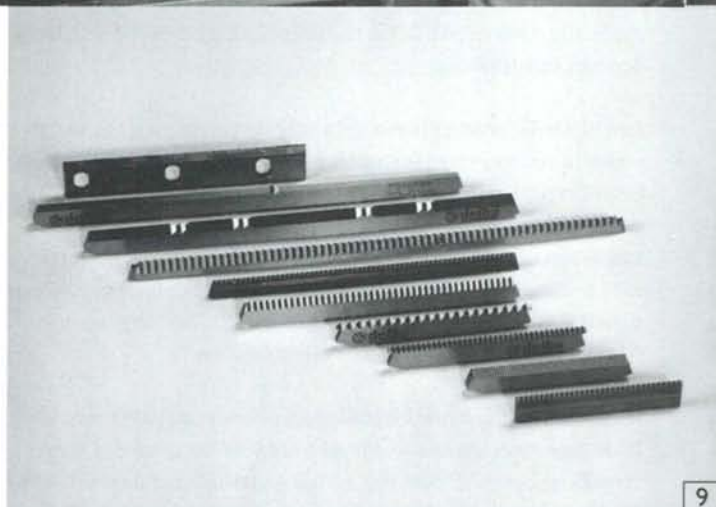


8

in de techniek. Je moet er toch een stuk eigen inventiviteit in stoppen. Mijn vader heeft ook een technische baan en die heeft me sterk gestimuleerd."

Interessant is ook dat HBO-studenten via de zgn. MKB-route bij Delba praktijk opdoen. Herman Steunenberg (afbeelding 7) is een van de jonge mensen die leren en werken combineren en er ook nog een aardige zakcent aan over houden: "Ik leer in drie jaar dezelfde theorie die dagstudenten in anderhalf jaar opdoen, maar ik hoef dan ook geen praktijkjaar te doen." Via de MKB-route krijgen studenten vijf jaar na het voltooien van de VWO-opleiding hun HTS-diploma. Na twee jaar op school combineren ze de volgende drie jaar praktijk en theorie: in drie blokken van een half jaar gaan ze één dag in de week naar school en werken de rest van de tijd in het bedrijf. Peters zorgt dat ze daarbij regelmatig van job wisselen zodat ze aan het eind van hun praktische opleiding universeel inzetbaar zijn. Hij vindt dat sowieso een belangrijk aspect van zijn personeelsbeleid: "Ik zorg dat mensen niet vastroesten in hun werk maar veelzijdig inzetbaar zijn. Dat maakt het werken voor de mensen leuker en is voor het bedrijf beter."

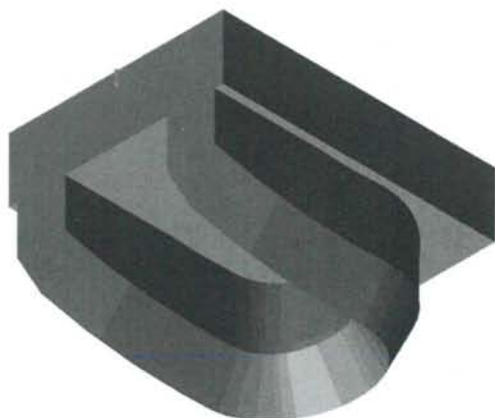
Peters erkent dat er een risico bestaat dat mensen na hun praktijkopleiding elders in het bedrijfsleven een baan zoeken, zodat Delba voor niets in ze heeft geïnvesteerd. Maar door te zorgen voor én een afwisselende en uitdagende baan én voor concurrerende arbeidsvoorwaarden valt dat "weglopen" in de praktijk nogal mee.



9



10



11

Producten met precisie

Delba Special Carbide Products is gespecialiseerd in de bewerking van niet alleen hardmetaal maar ook gesoldeerde of gelijmde combinaties van hardmetaal en staal, zie afbeelding 8. Andere voorbeelden van producten van Delba zijn getande of gegolfde strippen die worden gebruikt in de halfgeleider- en de sigarettenindustrie. Ook maakt Delba hardmetalen messen voor het afsnijden van kunststoffolie.

Een bijzonder product is een strip voor de bevestiging van meetlinialen in een meetmachine van Schut Geometrische Meettechniek bv in Groningen, zie afbeelding 9. Die driedimensionale CNC-coördinaten-meetmachine (afbeelding 10) van Nederlands fabrikaat – met de naam De Meet 400 – maakt gebruik van magnetische linialen van Sony. Aangezien die linialen een afleesnauwkeurigheid van 0,1 µm kunnen hebben, moeten de bevestigingsstrippen van Delba aan hoge precisie-eisen voldoen.

Interessant vanuit bewerkingsoogpunt is ook een zgn. U-mes, dat in de sigarettenindustrie wordt gebruikt voor het afsnijden van verpakingsstrips. Afbeelding 11 laat een driedimensionale CAM-tekening zien die bij Delba is gemaakt als hulpmiddel bij het programmeren van een CNC-gestuurde freesmachine. Uit de vorm

van het product, dat in eigen huis wordt gehard, blijkt duidelijk dat die programmering een uitdaging van formaat moet zijn.

Tot slot

Expertise opbouwen in de precisiebewerking van staal en hardmetaal met behulp van diamant en keramiek is één ding. Maar zorgen dat die expertise ook in de toekomst behouden blijft en zelfs wordt uitgebreid, is een andere zaak. Door zijn jarenlange ervaring door te geven aan een jongere generatie via doelgerichte praktijkopleidingen in eigen bedrijf is Tonny Peters erin geslaagd ook die tweede ambitieuze doelstelling gestalte te geven.

Voor informatie over de precisieproducten van Delba kunt u vragen naar Carla van Mil. Voor de machines van Okamoto, Joemars en Brother, en de gereedschappen van Rappold en SAV kunt u Maarten Janssen benaderen.

Informatie

Delba, Nieuwgraaf 123, 6920 AE Duiven.

Tel. 026-3118883, fax -3119122.

E-mail: info@delba.nl.

Internet: www.delba.nl.

KOPER / MESSING / ALUMINIUM

U HOEFT NIET VERDER TE BLADEREN

als u verzekerd wilt zijn van een enorme keuze in platen, staven, buizen, draad, profielen, etc.

Zaken doen met Salomon's Metalen betekent zeker zijn van meedenken bij leverschema's, realisatie en duidelijke afspraken.

Salomon's Metalen zaagt koper, messing en aluminium exact op de door u gewenste lengte en levert binnen 24 uur.



Bel nu 050 - 5421200
en ontvang p/o het dikke,
aktuele voorraadboek.



KOPER

E-Cu / SFCu

- - 2 t/m 250 mm
- - 4 t/m 200 mm
- - 6 t/m 60 mm
- - 6 x 2 t/m 100 x 60 mm
- - buis/holstaf t/m 156 mm

MESSING

Ms 58 / Ms 60Pb / Ms 63

- - 1 t/m 350 mm
- - 2 t/m 150 mm
- - 2 t/m 110 mm
- - 3 x 2 t/m 100 x 80 mm
- - 6 x 3 t/m 40 x 6 mm
- - kartel 5 t/m 23 mm
- - buis/holstaf t/m 200 mm

ALUMINIUM

50 ST / 51 ST / 28 ST / SiPb

- - 2 t/m 500 mm
- - 5 t/m 200 mm
- - 5 t/m 80 mm
- - 10 x 2 t/m 125 x 70 mm
- - buis/holstaf t/m 365 mm
- ★ plat + vierkant ook in kortspanig 28 ST

SALOMON'S

METALLEN B.V.

*Voorsprong
door Voorraad!*

GOTENBURGWEG 24,
9723 TL GRONINGEN TEL. 050-5421200 FAX 050-5416892

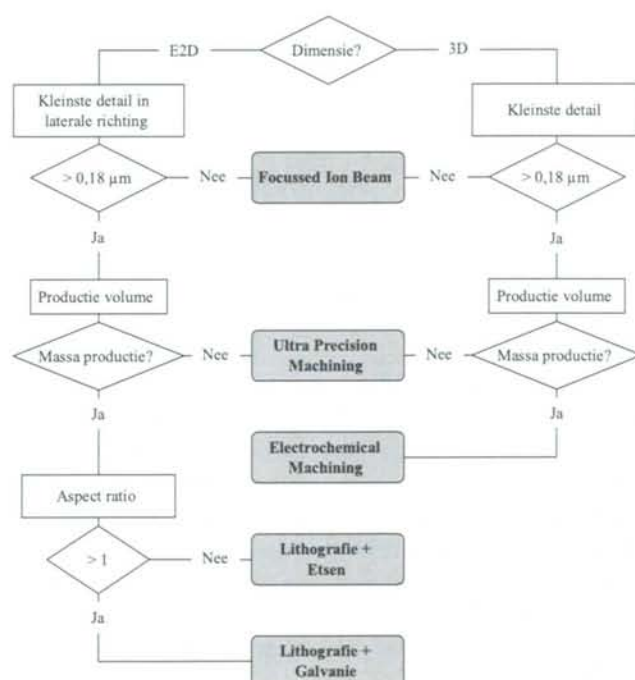
Microsysteem technologie en galvanotechniek

Er is de laatste jaren een zeer sterke trend tot miniaturisatie. Alles moet kleiner, lichter en goedkoper. Door deze voortschrijdende miniaturisatie kan men echter problemen krijgen met de maakbaarheid van het product en de precisie van de techniek die men toepast. Bovendien is het lang niet altijd duidelijk welke techniek men voor een bepaald product het beste kan toepassen. Er is altijd een aantal punten dat in overweging genomen moet worden, waaronder:

1. Dimensies van het product.
Liggen de dimensies van het product in het millimeter of in het micrometer bereik?
Is het product werkelijk 3D, of is het een 2D-structuur welke in de 3^{de} dimensie wordt verlengd (Extended 2D)?
2. Vereiste precisie.
Zijn relatieve toleranties van 10 % acceptabel, of is een absolute nauwkeurigheid van $<1 \mu\text{m}$ vereist?
3. Productie volume.
Gaaf het om een prototype, een kleine serie of om massaproductie?
4. Materiaal.
Is het toe te passen materiaal elektrisch geleidend, hard en bros, of juist heel zacht?
Zijn de functionele eigenschappen van het basismateriaal optimaal?

Dit soort afwegingen moeten leiden tot de keuze van het meest geschikte proces voor het te maken product. Galvaniseren kan een van die processen zijn. In het algemeen wordt galvaniseren in microsystemen toegepast voor low cost, high volume systemen, waarbij hoge eisen worden gesteld aan de nauwkeurigheid en de reproduceerbaarheid van het te maken product. Het galvaniseren gaat dan vaak gepaard met lithografie, waarbij een uiterst reproduceerbaar patroon op een geleidende drager wordt aangebracht.

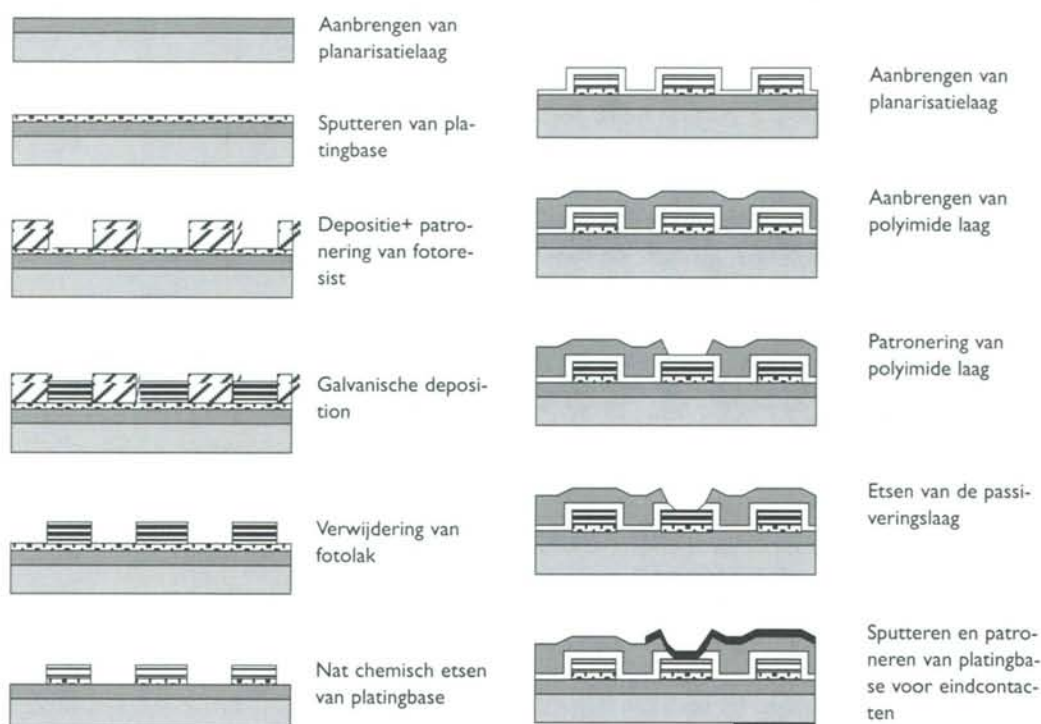
Een voorbeeld van een beslissingsboom, op basis waarvan men voor de combinatie lithografie -galvanotechniek kiest is weergegeven in afbeelding 1.



Afb. 1: Voorbeeld van een beslissingsboom, op basis waarvan men voor lithografie in combinatie met galvanotechniek kan kiezen.

Lithografie – Galvanotechniek

Een techniek die uitermate geschikt is voor het maken van geleidende structuren op een niet geleidende ondergrond als silicium, keramiek, of engineering kunststof is de combinatie van lithografie en galvanotechniek. Bij deze techniek wordt de ondergrond eerst geleidend gemaakt door het aanbrengen van een platingbase met behulp van PVD of stroomloos neerslaan. Vervolgens wordt er fotoresist aangebracht, belicht en ontwikkeld. De aldus ontstane structuren kunnen in een volgende stap galvanisch versterkt worden. Als laatste wordt de fotogevoelige lak weer verwijderd, en wordt de platingbase weg geëtsd, waardoor geïsoleerde structuren op het drager materiaal ontstaan.



Afb. 2 Stappen in de productie van dunne film spoelen.

Voorbeeld

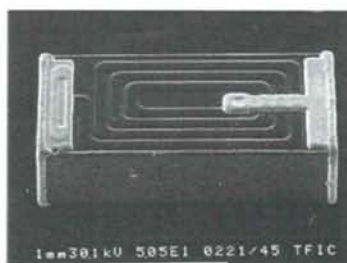
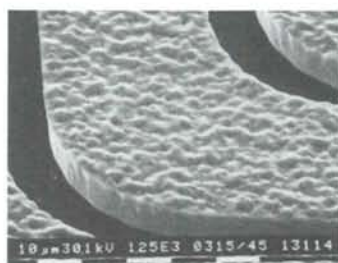
Hogere werkfrequenties en de noodzaak tot het verlagen van kosten zijn belangrijke drijvende krachten achter de ontwikkelingen van nieuwe elektronische circuits. Dit resulteert ook in hogere eisen aan de passieve componenten die in de circuits gebruikt worden. Om aan deze eisen te voldoen, werd een nieuwe generatie passieve componenten ontwikkeld op basis van dunne film technologie en galvanotechniek. Een van de componenten die op deze manier vervaardigd worden is de TFI (Thin Film Inductor). Om lithografie op het ruwe Al_2O_3 -substraat mogelijk te maken wordt er eerst een planarisatie laag aangebracht (zie afbeelding 2).

Vervolgens wordt 300 nm koper gesputterd. De resist die hierop wordt aangebracht is ongeveer 13 μm dik en wordt gepatroneerd met behulp van fotolithografie. In de openingen die op deze manier in de lak zijn ontstaan wordt galvanisch 10 μm -koper opgegroeid. Nadat de fotolak en de platingbase zijn verwijderd is het patroon duidelijk zichtbaar. In afbeelding 3 zijn de bijna verticale wanden van het patroon te zien. Vervolgens wordt er een passiveringslaag en een polyimide laag op de spoelen aangebracht. Het

polyimide wordt in een tweede lithografische stap gepatroneerd. Tot aan deze stap bevinden de spoelen zich samen op een 4" wafer. Voor de laatste stap worden de individuele componenten uit de wafer gezaagd. De kopcontacten van de spoel worden galvanisch opgegroeid met een stack van koper, nikkel en tin. Op deze manier kunnen spoelen met uitstekende hoogfrequent eigenschappen worden geproduceerd. Het galvanisch proces kan eenvoudig opgeschaald worden zonder verlies aan kwaliteit. Een inductienauwkeurigheid van beter dan 2% en hoge kwaliteitsfactoren ($Q = 25$ tot 30 bij 500 MHz) kunnen in een industrieel proces gehaald worden. Het proces is bovendien niet beperkt tot enkelvoudige spoelen. Men kan ook compleet geïntegreerde schakelingen op deze manier vervaardigen. Zo kunnen "intelligente" hoogfrequent onderdelen voor de mobile communicatie worden gemaakt.

Bronnen:

- 1) Madou, M. J., "Fundamentals of Microfabrication", CRC Press, 1997
- 2) Interne rapporten, Philips Galvanotechniek Eindhoven



Afb. 3 SEM opnames van het koper patroon (links) en een compleet product (rechts).

Informatie

Philips Galvanotechniek Eindhoven
 Ir. D.L. de Kubber
 Postbus 218, 5600 MD Eindhoven
 Gebouw SFO 174
 Tel: 040 273 62 55
 Fax: 040 273 45 93
 E-mail: p.g.e.commercialsupport@Philips.com

Motioncontroller voor meetmachines

In veel meetsystemen is het ook noodzakelijk om een meting te starten bij het bereiken van een bepaalde positie(s). Vanwege de flexibiliteit wil men deze positie via software vrij in kunnen stellen. Uit het oogpunt van nauwkeurigheid wil men dit via de hardware laten verlopen. Een motioncontroller dient hier voorzieningen voor te hebben wil men deze zaken kunnen realiseren.

Bij een volautomatisch verlopende meetcyclus dienen meestal vele datapunten te worden verwerkt. Deze data bestaat hoofdzakelijk uit digitale positiemetingen maar soms ook, voor bijvoorbeeld krachtmetingen, uit analoge signalen.

Meer en meer zien we dat een PC deze data bewerkt, toont op een beeldscherm, via een netwerk doorstuurt of opslaat op een harde schijf. De motioncontroller zal de in een meetcyclus gevonden data moeten kunnen aanbieden aan de PC. Gezien de grote hoeveelheid software die er voor Windows gebaseerde systemen verkrijgbaar is zal dit alles onder Windows 95 of Windows NT moeten kunnen draaien. Een veel gebruikte uitvoeringsvorm is deze waarbij de data in een voor de motioncontroller en de PC gemeenschappelijk geheugengebied (DPRAM) wordt overgedragen. Op deze manier kan soms ook onder een niet real-time besturingssysteem een hele cyclus of zelfs continu gemeten worden.

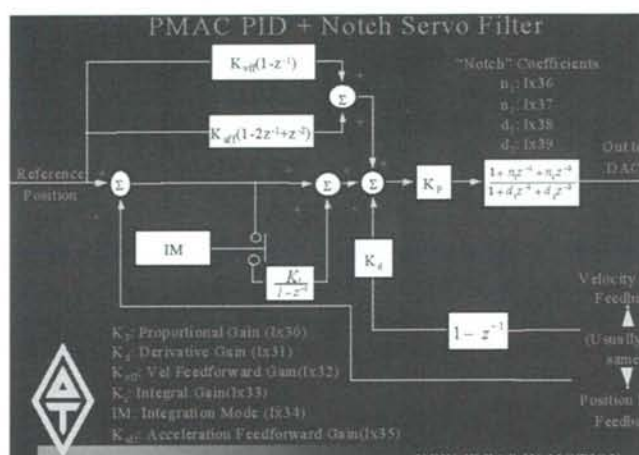
PMAC

Een voorbeeld van een motioncontroller waarbij de hierboven omschreven mogelijkheden grotendeels zijn geïntegreerd is de PMAC 2

De PMAC 2-kaart is geschikt voor de aansturing van puls en direction stappenmotor versterkers of analoge 0-+-10V-servo-versterkers. Met behulp van accessoires is de kaart hiervoor optimaal aan de applicatie aan te passen. De resolutie van de analoge uitgang bedraagt 18 bit. De maximale frequentie van de puls uitgang bedraagt 10 MHz waardoor ook bij microstepping drives een zeer fijne resolutie ingesteld kan worden.

Voor een goed resultaat is een goed ingestelde regeling vereist. Voor het instellen van de optimale parameters is een autotuner aanwezig. Naast proportionele, integrerende en differentiërende acties zijn ook feedforward voor snelheid, acceleratie en wrijving aanwezig. Voor mechanische resonanties is er een notch-filter aanwezig. De servo-updaterate kan minimaal 10 microseconde per as bedragen (optie) waardoor de regeling zowel snel als nauwkeurig is.

Bij de PMAC is het verkrijgen van een uitgang op een bepaalde positie en het nauwkeurig vinden van een bepaalde referentie-



PID, feedforward en notch-filter van de PMAC. De parameters kunnen interactief of met behulp van een autotuner worden ingesteld. Optioneel is een poleplacement-filter leverbaar.

positie met behulp van een gate-array uitgevoerd. De gate-array is via applicatiesoftware te programmeren op welke positie een uitgang gezet moet worden. De tijdvertraging bedraagt maximaal 1 encoderpuls dat wil zeggen 50 ns bij 20 MHz. Bij het vinden van een referentiepunt wordt deze exacte positie hardwarematig geklokt en bewaard in de gate-array. Deze positie kan via de applicatiesoftware worden opgevraagd en verwerkt.

Er zijn encoder signaalfrequenties mogelijk tot 40 MHz voor S0, S90 signalen met 'capturing' van posities beter dan een 1 puls. De door de U.S. National LAB gemeten herhalingsnauwkeurigheid voor een referentie positie bedraagt 10 ns. Met behulp van een 'equal'-signaal kan een uitgang op een bepaalde positie worden gezet met een nauwkeurigheid van 1 puls en een maximale herhalingsfrequentie van 10 MHz. Voor sinus-encoders bestaat er een interpolator die de resolutie tot maximaal 4096 maal verhoogd.

Voor het verzamelen van meetgegevens staan 24 real-time kanalen ter beschikking. Via de software kan aangegeven worden welke data verzameld moet worden bijvoorbeeld posities, snelheden, volgfouten of analoge ingangen. De data kan door de PMAC automatisch in DPRAM-geheugen worden geplaatst. Er zijn drivers (DLL's, OCX) waarmee de data in een Windows NT- of 95-applicatie kan worden verwerkt. Ook voor het in meetmachines populaire programma LABVIEW bestaat er een driver.

De PMAC 2-motioncontroller kan maximaal acht assen aansturen. De nieuwste generatie is in staat 32 assen aan te sturen waarmee praktisch iedere meetmachine gerealiseerd kan worden.

Uittreksel CIRP-Annalen

Vertaling en bewerking: Frans Zuurveen

Aan het eind van de vorige eeuw schreven prof. Piet Schellekens en enkele van zijn medewerkers een zeer uitgebreid artikel voor de bekende CIRP-Annalen [1]. Dat klinkt vreselijk lang geleden, maar oud-belegen is het verhaal beslist niet. Omdat het flink veel tijdloze informatie bevat, is het de moeite waard de essentie ervan te verwerken in een reeks artikelen in Mikroniek. De elementen die al eerder in dit tijdschrift aan de orde kwamen - zie "Status en trends in de werktuigbouwkundige precisietechnologie" [2] - zijn vanzelfsprekend weggelaten. Ook een groot deel van de ruim tweehonderd literatuurverwijzingen van het oorspronkelijke artikel is niet opgenomen: er wordt alleen verwezen naar de meest relevante literatuur.

Precisiegericht ontwe

Veel activiteiten in de hedendaagse industrie en in kennisinstellingen zijn gericht op de realisatie van producten met hoge precisie. Het vervaardigen van zulke producten is gebaseerd op een gespecialiseerde tak van wetenschap die "precisietechnologie" wordt genoemd. Daarin zijn een drietal basisgebieden te onderscheiden:

- precisiegericht ontwerpen,
- optische en mechanische metrologie,
- precisie-bewerkingstechnologie.

In dit artikel zal vooral de eerstgenoemde discipline aan de orde komen, waarbij precisiegericht ontwerpen in het bijzonder wordt opgevat als mechatronisch ontwerpen voor hoge precisie. Dat omvat het totaal van materiaalkeuze, mechanica, elektronica, regeltechniek, thermomechanica, dynamica, computer-programmatuur en besturings-software.

Wat draagt bij aan precisie?

In precisie-instrumenten en -machines is een interactie te onderkennen van een groot aantal onderdelen, die ieder voor zich de uiteindelijke onnauwkeurigheid beïnvloeden door afwijkingen die het gevolg zijn van geometrische, kinematische en dynamische effecten. Hierna zullen we ieder van deze effecten afzonderlijk onder de loep nemen.

Geometrie

In het beginstadium van een ontwerp ontstaat de geometrie vanuit

de intentie een bepaalde functie te realiseren. In dat stadium is er nog sprake van eenvoudige vormen: bijvoorbeeld cilinders voor assen of vlakken voor geleidingen. In de praktijk is de vorm verre van ideaal: door de eindige bewerkingsnauwkeurigheid zijn lijnen niet recht en cirkels niet rond. Een verstandige keus voor de bewerkingsmethode kan hier de nauwkeurigheid van het onderdeel verbeteren. Want in het algemeen veroorzaakt een groter aantal assen bij het bewerken ook meer afwijkingen. Aan de andere kant kan een verplaatsing langs een extra as nuttig zijn om fouten te compenseren.

Nauwkeurigheid hangt niet alleen af van macroscopische maar ook van microscopische effecten: oppervlakteruwheid. Bij veel toepassingen is die bepalend voor het resultaat, zoals bij lagers. Het effect op het gedrag van "vast" aan elkaar verbonden delen is wat minder evident, maar wordt duidelijk als eigenschappen als stijfheid, demping, hysteresis en thermische geleiding worden beschouwd. Geometrische afwijkingen zijn niet alleen het gevolg van het gedrag van de bewerkende machine op zichzelf. Ook de omgeving speelt een rol door trillingen en warmteoverdracht. Een stabiel geacht materiaal als graniet, bijvoorbeeld, vervormt door vochtopname.

Geometrische afwijkingen ontstaan ook doordat machines worden samengesteld uit meerdere onderdelen. Hier spelen overwegingen als vorm- of krachtgesloten constructies, en de keus uit lijmen, schroeven dan wel uit één stuk bewerken een belangrijke rol.

Ook al is er een volmaakte vorm bereikt, dan kunnen er toch nog afwijkingen ontstaan door deformatie als gevolg van een wisselende belasting, bijvoorbeeld bij een bewegende slede. Met de juiste modellen zijn deze afwijkingen voorspelbaar en daardoor compenseerbaar [3].

Een ander geometrisch probleem is de deformatie door het vastzetten van het werkstuk bij de bewerking. Aan de ene kant mag de fixatie het werkstuk niet vervormen, aan de andere kant moet deze voldoende sterk zijn om de bewerkingskrachten te weerstaan. Bovendien moet er nog een zekere mate van thermische expansie mogelijk blijven. Een soortgelijke problematiek is te

rol gaan spelen. De effecten daarvan zijn te beheersen door het kiezen van "gladde" bewegingspatronen, zodanig dat er geen sprong optreedt in de versnelling. Er kan bijvoorbeeld voor de overgang tussen twee punten worden gekozen voor een "scheve sinus" in plaats van een trapeziumvormig verloop. Het vermijden van speling is zinvol ter voorkoming van ongewenste dynamische positioneerfouten. Bij roterende onderdelen kan symmetrie onbalans voorkomen. In de meeste gevallen is het belangrijk massa's en massatraagheidsmomenten te minimaliseren, waarbij de aandrijfkracht zo mogelijk door het massamiddelpunt dient te gaan.

Een andere belangrijke factor is de stijfheid. Bij het minimalise-

rpen: status en trends

herkennen bij het monteren van sensoren in precisie-instrumenten. Hier kunnen kinematische of semi-kinematische constructies een uitweg bieden.

Kinematica

We hebben in de precisietechnologie in het algemeen te maken met machines die niet statisch zijn. Er moet dikwijls via de kinematica een mathematisch gedefinieerd bewegingspatroon worden uitgevoerd dat is gebaseerd op theoretische lengten, posities en krommen die zijn vastgelegd door instelpunten oftewel "set-points". Het werkelijke patroon zal in de praktijk afwijken van het theoretische wat betreft vorm, snelheid en versnelling.

Vandaag de dag zijn de gerealiseerde verplaatsingen niet meer uitsluitend het resultaat van de samenwerking van mechanische onderdelen, maar is er sprake van servobesturing met behulp van sensoren en actuators. Eigenschappen als kracht en snelheid van actuators, en resolutie van sensoren bepalen samen met de regelstrategie en de mechanische reproduceerbaarheid de nauwkeurigheid van de beweging. Bij de samenwerking van meer dan één as speelt ook de synchronisatie een rol, bijvoorbeeld bij het frezen van een cirkelvorm door de besturing van twee onderling loodrechte assen.

Dynamica

In het algemeen moeten er in een machine onderdelen worden versneld en vertraagd, wat betekent dat dynamische effecten een

BRANSON

Ultrason verbinden met Servobesturing



Profileren van Amplitude en Kracht met Servostatief en Procescomputer.

- hogere lassterkte door een brede laszone
- verbeterde optische kwaliteit van de gelaste delen
- geringe materiaal uittreding
- verbeterde spanningsverdeling in de verbindingzone

De Amplitudeprofilering biedt voordelen bij amorphe thermoplasten.

De Krachtprofilering is optimaal toepasbaar bij deeltkristallijne materialen.

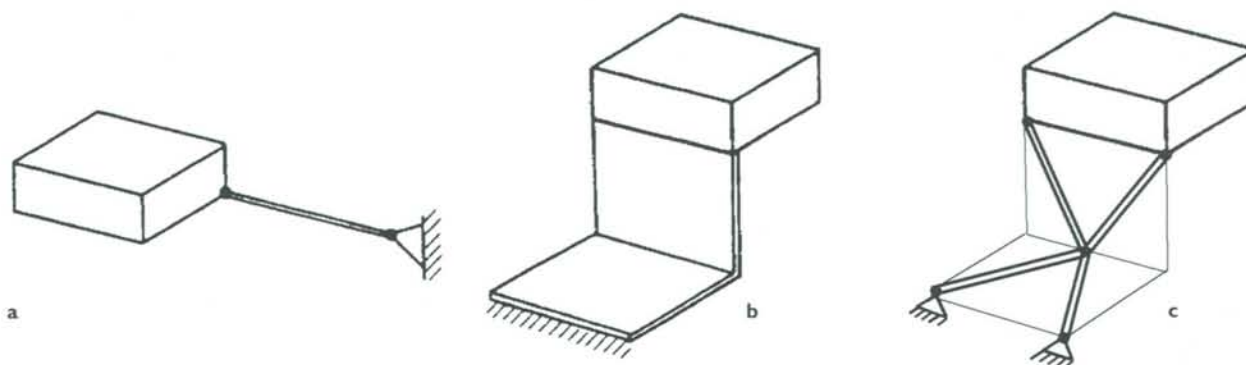
Kenmerken van het Servostatief;

- snel instellen van de werkhogte
- hoge reproduceerbaarheid van de lascyclus
- geen perslucht nodig

**BRANSON
ULTRASONICS
B.V.**

Postbus 9
Techni-show
stand 9.B.041
3760 AA Soest NL
Tel: +31 35 60 98 111
Fax: +31 35 60 98 120

Internet:
www.branson.nl



Afb. 1 Enkele kinematische constructies met één belemmerde vrijheidsgraad voor translatie. De stang van a is in b vervangen door een gevouwen bladveer, in c door een viertal stangen.

ren van krachten en het maximaliseren van stijfheid gaat het niet alleen om de hoeveelheid en de soort van het toegepaste materiaal maar ook om de verdeling ervan. Dynamische effecten hebben ook vaak een uitwendige oorzaak: trillingen en geluid. Met name vloertrillingen kunnen het gedrag van precisiemachines nadelig beïnvloeden. Trillingsisolatie kan hier uitkomst bieden.

Ontwerpprincipes

Abbe en Bryan

In 1890 formuleerde Ernst Abbe zijn – nu overbekende – ontwerpregel ongeveer als volgt: “Een meetinstrument dient zo te zijn geconstrueerd dat de afstand die moet worden gemeten, in het verlengde ligt van de verdeling op de liniaal die als meetreferentie dient.” Om ook die gevallen in aanmerking te nemen waarbij het onmogelijk is “in lijn” te construeren, definieerde Bryan een algemenere ontwerpregel [4]: “Een systeem voor het meten van verplaatsingen dient in het verlengde te liggen van het punt – het hart van de meetkogel of het uiteinde van het gereedschap – waarvan de verplaatsing moet worden gemeten. Als dat niet realiseerbaar is, moet of de geleiding die de verplaatsing bewerkstelligt, rotatievrij zijn of de gemeten hoekafwijking in de verplaatsing worden gebruikt om de afwijking van het principe van Abbe te corrigeren.”

Kinematisch construeren

Maxwell beschreef in 1890 kinematisch construeren als volgt: “De delen van een instrument zijn niet oneindig stijf. Als een lichaam op meer dan zes manieren in zijn bewegingen wordt beperkt, is het onderworpen aan inwendige spanningen. Het wordt daardoor gedeformeerd, maar dat is alleen op microschaal meetbaar.”

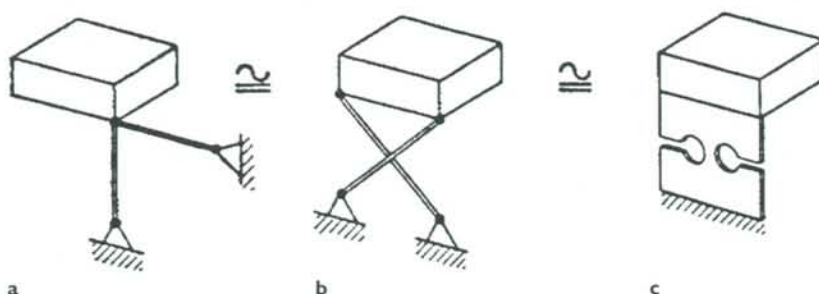
Kinematica, geëvolueerd vanuit de wiskunde, gaat uit van ge-

dealiseerde, oneindig stijve componenten. Desondanks vormt het een goed uitgangspunt voor mechanisch zuivere constructies, gebaseerd op het belemmeren van het juiste aantal vrijheidsgraden, translaties dan wel rotaties. Prof. W. van der Hoek heeft deze principes uitgebreid beschreven in zijn collegedictaten voor de TU Eindhoven [5]. Delen hiervan zijn door prof. M.P. Koster opgenomen in het boek “Constructieprincipes” [6].

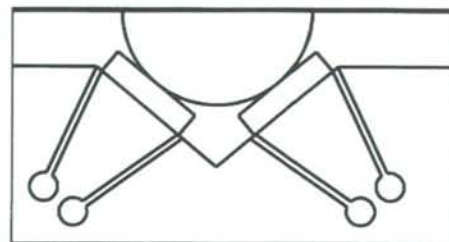
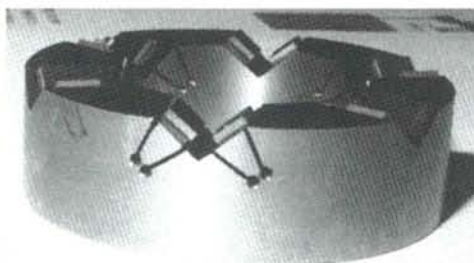
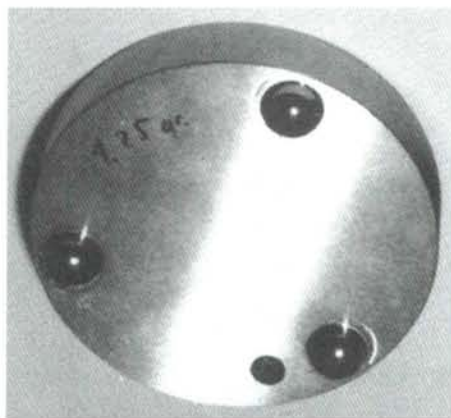
Afbeelding 1 geeft enkele voorbeelden van het beperken van één vrijheidsgraad, afbeelding 2 van het beperken van twee vrijheidsgraden. Interessant is de verbeterde kinematische oplegging van afbeelding 3 [7]. Hierin is het klassieke ontwerp met drie V-groeven voorzien van zes min of meer flexibele oplegvlakken met behulp van elastische scharnieren. Wrijvingseffecten zijn daardoor vergaand geëlimineerd, zodat de hysteresis is gereduceerd van 0,42 tot 0,03 μm .

Thermisch pad

Bij een samenstelling van mechanische onderdelen bepaalt een zgn. thermisch pad de onderlinge verplaatsing van gespecificeerde elementen, bijvoorbeeld gereedschap en werkstuk, ten gevolge van temperatuurverandering. Zo'n pad dient uiteraard zo kort mogelijk te zijn. Thermische expansie is mechanisch compenseerbaar door het aanpassen van de effectieve lengte van onderdelen in combinatie met de keuze voor materialen met een geschikte thermische uitzettingscoëfficiënt. Afbeelding 4 laat zien hoe een thermisch centrum TC kan worden gecreëerd, van waaruit componenten ten opzichte van elkaar kunnen expanderen.



Afb. 2 Enkele kinematische constructies met twee belemmerde vrijheidsgraden voor translatie.

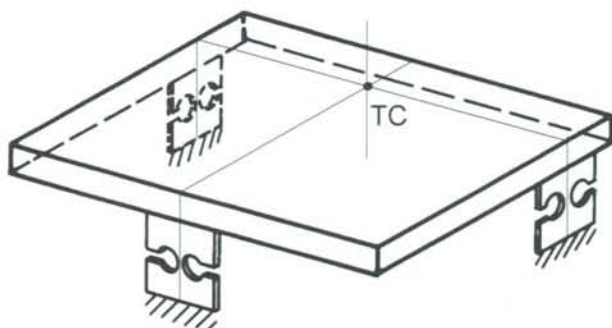


Afb. 3 Verbeterde kinematische oplegging, waarin wrijvingseffecten nage-
noeg zijn geëlimineerd.

Stabilisering van de omgevingstemperatuur van een machine tot bijvoorbeeld $\pm 0,1$ °C per dag biedt vaak geen oplossing, omdat er zich warmtebronnen in of in de nabijheid van de machine bevinden. Deze bronnen veroorzaken niet-stabiele temperatuurverdelingen in de machine en daarmee mechanische vervormingen. Soms zijn de effecten van warmtebronnen compenseerbaar, maar het is beter de ontwikkelde warmte zo af te voeren dat de "dimensionele schade" beperkt blijft.

Mechanisch pad

Een mechanisch pad kan worden gedefinieerd als een reeks van mechanische onderdelen, die op een gedefinieerde plaats hun onderlinge positie bepaalt. Bij de combinatie van werkstuk en gereedschap, bijvoorbeeld, bestaat het mechanische pad uit spindel, lagers, lagerhuis, geleidingen, frame, aandrijving, inspangereedschap en de beitel zelf. Uiteraard is het belangrijk alle componenten en verbindingen in het mechanische pad zo stijf mogelijk te maken.



Afb. 4 De creatie van een thermisch centrum TC in een constructie met zes belemmerde vrijheidsgraden.

In het ontwerpproces is het belangrijk de mechanische paden te onderkennen en ze te onderscheiden in serie- en parallel-geschaakte paden. Langs serie-geschaakte paden mogen geen abrupte stijfheidsveranderingen plaatsvinden. De zwakste schakel in zo'n pad is te versterken door materiaal vanuit sterke schakels over te dragen. Bij parallelle paden daarentegen gaat het erom de stijfste onderdelen nog verder te verstijven, bij voorkeur ten koste van zwakkere parallelle paden.

Technisch gezien is het dikwijls onmogelijk het verplaatsings-

meetsysteem dicht bij het gereedschap te positioneren. Daarom is het van groot belang het mechanische pad tussen meetsysteem en gereedschap zeer stijf uit te voeren ten einde het effect van de bewerkingskrachten te minimaliseren.

Meetreferentie-frame

Een meetreferentie-frame is ontkoppeld ten opzichte van het basisframe van de machine. Het gaat er daarbij om de functie van het doorleiden van krachten te scheiden van die van het doorleiden van verplaatsingen, zodat interne en externe krachten geen invloed hebben op de vorm van het meetframe. In de literatuur wordt gesuggereerd het meetframe zo klein mogelijk te maken en te vervaardigen van een thermisch maatvast materiaal, bijvoorbeeld zerodur, een soort glaskeramiek. Als dat niet mogelijk is, verdient het aanbeveling de temperatuur van het meetframe te stabiliseren met bijvoorbeeld een olieniveau.

Positie van de aandrijfkraft

Een goed mechanisch ontwerp gecombineerd met servobesturing maakt het mogelijk een hoge snelheid te realiseren zonder verlies aan nauwkeurigheid en flexibiliteit. Dat is duidelijk aangetoond bij de aandrijving van bijvoorbeeld CD-spelers en wafersteppers. Zo'n goed mechanisch ontwerp houdt onder andere in dat de door de actuator ontwikkelde aandrijfkraft in het verlengde ligt van de resultante van de reactiekrachten. Op deze manier worden koppels op de bewegende slede vermeden.

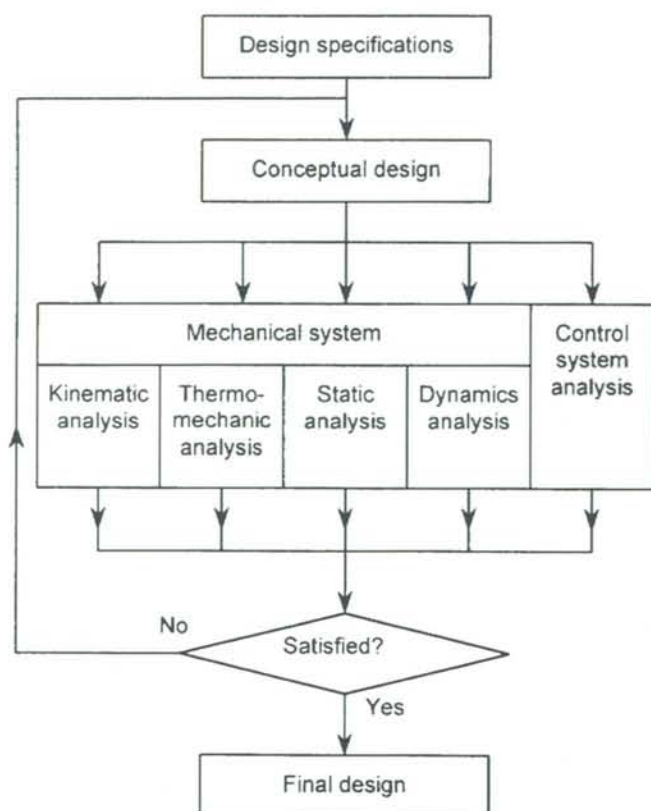
Krachtcompensatie

Gewichtcompensatie

In diverse meerdimensionale machines worden verticale sleden toegepast. Om ongewenste warmteontwikkeling door de aandrijving te voorkomen is het wenselijk het gewicht van de slede te compenseren. Maar contragewichten vergroten de totale massa, dus is het beter alternatieven als elektromagneten, pneumatische of hydraulische cilinders of tensatorveren te gebruiken.

Compensatie van reactiekrachten

Vooral bij hoge frequenties, zoals die voorkomen bij snelle, servogestuurde machines, veroorzaken de reactiekrachten ongewenste excitaties van het frame. Naast de gebruikelijke aanpak van massa-, stijfheids- of dempingsvergroting is het mogelijk een



Afb. 5 Blokschema als hulpmiddel bij het ontwerpen van machines en instrumenten.

extra – zware - massa aan te brengen tussen de belastingskracht en het frame, die door de reactiekracht in tegengestelde richting wordt versneld en vertraagd.

Negatieve stijfheid

Het voordeel van elastische elementen, vooral als ze fungeren als scharnieren, is dat speling en wrijving afwezig zijn. Maar bezwaren zijn dat de slag wordt beperkt door de vloeigrens van het materiaal en dat er een aandrijving nodig is waarvan de kracht toeneemt met de verplaatsing. Dat laatste kan worden ondervangen door passieve elementen met negatieve stijfheid toe te voegen. In de literatuur zijn verschillende methoden beschreven voor het creëren van negatieve stijfheid [8].

Symmetrie

Het ontwerpen met zoveel mogelijk symmetrie in de mechanische structuur is gunstig met het oog op het voorkomen van zowel onbalans als thermische problemen. Een driedimensionaal voorbeeld daarvan is de viervlak-structuur die al in 1988 is voorgesteld door Lindsey [9]. Die benadering, waarbij wordt uitgegaan van een thermisch centrum, is ook in onze groep is toegepast bij het ontwerp van een meetmachine [2].

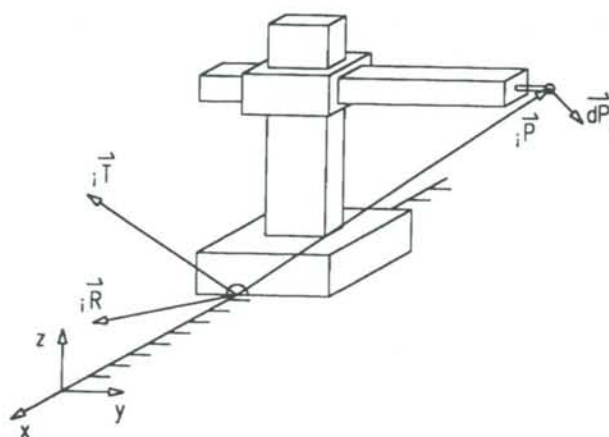
Reproduceerbaarheid

Bij precisiemachines verstaat men onder reproduceerbaarheid een gedrag dat bij dezelfde machine-acties onder dezelfde omstandigheden een zelfde resultaat oplevert. Dit wordt ook wel deterministisch gedrag genoemd. Afwijkingen van dat gedrag zijn het

gevolg van slechte ontwerpen, waarbij onder andere hysteresis, wrijving, speling en beperkte stijfheid een rol spelen. In de modelvorming worden deze effecten meestal niet meegenomen, omdat er ten onrechte een statisch karakter aan wordt toegekend. Hierna gaan we nader op modelvorming in.

Voorspelbaar ontwerpen met modelvorming

In de nabije toekomst neemt de behoefte aan ultra-precisiemachines toe. De ontwikkeling daarvan is een kostbare aangelegenheid, zodat het steeds belangrijker wordt een machine zo te ontwerpen dat deze ook in het prototypestadium meteen goed werkt: "right the first time". Modelvorming en een vroegtijdige analyse van de foutenbronnen zijn daarvoor onontbeerlijk. Die foutenbronnen zijn van kinematische, thermomechanische, statisch- en dynamisch-mechanische en regeltechnische oorsprong. Afbeelding 5 laat zien hoe daarvoor een iteratief blokschema met keuzevragen kan worden toegepast. Voor het analyseren van diverse foutenbronnen is de eindige-elementen-methode een waardevol gereedschap. We behandelen nu kort de analyse van die foutenbronnen.



Afb. 6 Een voorbeeld van kinematische modellering

Kinematische analyse

Er zijn modelleertechnieken ontwikkeld waarmee het mogelijk is de kinematische afwijking te berekenen als som van de individuele bijdragen van de diverse sleden, draaitafels en spindels. Voor een geleiding met slede kan, bijvoorbeeld, de kinematische bewegingsfout worden uitgedrukt als som van de translatievector en het uitwendige product van de lokale afwijkingsvectoren voor rotatie en positie [3], zie afbeelding 6. Zo'n kinematische modellering dient te worden toegepast voor de verschillende mechanische paden in de machine, dus startend bij de positionering van het werkstuk via alle onderdelen en scharnieren naar de positionering van het gereedschap of de meetsensor. Elke slede of rotatieas levert zo een positie-afhankelijke vector. De totale kinematische fout wordt gevonden door de som te nemen van alle foutvectoren die in de machine voorkomen.

Thermomechanische analyse

Thermische effecten leveren een aanzienlijke bijdrage aan de totale fout van precisiemachines- en instrumenten.

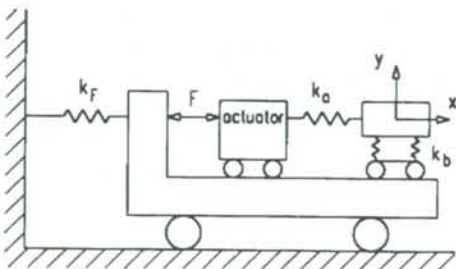
Temperatuurprofielen zijn door hun niet-stationair gedrag moeilijk mathematisch te beschrijven. In eerste benadering is foutenmodellering mogelijk door uit te gaan van spanningsvrije thermische expansie. Per bewegingsas worden de uitzettings- en vervormingseffecten berekend, waarna daaruit de resulterende kinematische effecten worden bepaald, zoals hiervoor is aangegeven. De totale afwijking door thermische effecten is dan te berekenen als som van de afzonderlijke foutvectoren. Ook hier is de eindige-elementen-methode met succes toegepast.

Statische analyse

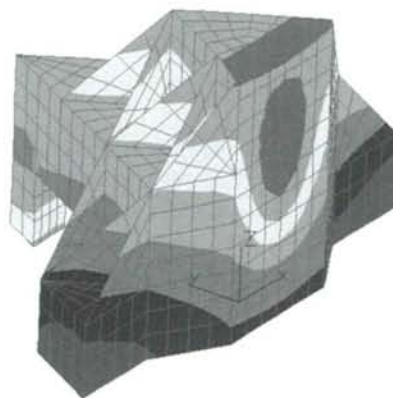
Het mechanische pad wordt ook beïnvloed door (quasi-)statische krachten, bijvoorbeeld gewichtskrachten bij de verplaatsing van massa's. Door de eindige stijfheid van onderdelen ontstaan er afwijkingen ter plaatse van het gereedschap of de meetsensor. In principe zijn zulke afwijkingen te berekenen met behulp van de klassieke elasticiteitsleer. Vandaag de dag zijn er echter geavanceerdere 3D-CAD-berekeningspakketten beschikbaar op basis van de eindige-elementen-methode, waarbij zelfs niet-lineair gedrag van materialen in rekening kan worden gebracht.

Dynamische analyse

De totale structuur van een machine is te modelleren als een combinatie van massa's en veren. Aangezien de meeste aandrijfkraften niet door het zwaartepunt van machineonderdelen gaan, brengen versnellingen en vertragingen ook rotaties teweeg. De mechanische stapresponsie van een constructie en de daarmee samenhangende trillingsverschijnselen hebben grote invloed op de onnauwkeurigheid van de machine. Daarom is het van groot belang de machinedynamica vast te leggen in een dynamisch model, zie afbeelding 7. Voor complete machine-ontwerpen is het verstandig de machine in substructuren op te delen en deze separaat te analyseren. Daarna worden de modellen samengevoegd en wordt de totale structuur geanalyseerd. Zo kunnen de laagste eigenfrequenties en de trillingsmoden worden voorspeld. "Lumped-mass"-modellen en modale analyse (afbeelding 8) zijn moderne mathematische gereedschappen die hun waarde hebben bewezen.



Afb. 7 Een voorbeeld van dynamische modellering, zonder demping in rekening te brengen.



SVIEW 4.18 File:Dwrsst2 LC 1/ 6 Vu=08 Lo=-55 La= 27 R=-2

Afb. 8 Het resultaat van modale analyse van een slede uitgevoerd in keramische platen.

Regeltechnische analyse

Tegenwoordig heeft een ontwerper de beschikking over regeltechniek als aanvulling op de klassieke mechanische constructiemethoden. Zonder regeltechniek zou bijvoorbeeld het succes van de uiterst nauwkeurige wafersteppers en CD-mastering-machines van Nederlandse oorsprong volkomen ondenkbaar zijn. Moderne regelsystemen werken met terugkoppeling van positie en snelheid. Soms wordt zelfs voorwaartse koppeling van snelheid en versnelling toegepast. Naarmate er meer graden van vrijheid zijn,

De NIEUWE SmartScope FLARE Contactloos 2D/3D Videomeetsysteem

- ✓ Uniek 'elevating-bridge' ontwerp
- ✓ Hoge eindnauwkeurigheid
- ✓ Zelfkalibrerende traploze 12x zoomlens
- ✓ LED Ring- en Profielverlichting
- ✓ Laserunit, voor **zeer nauwkeurige hoogtemetingen** ($E1 = \pm 0,5$ micrometer)
- ✓ Incl. geïntegreerd PC Pentium III Systeem
- ✓ Meetbereik vanaf X,Y,Z : 200 x 200 x 150 mm
- ✓ **Metingen volledig automatisch** (teach-in)



OGP Benelux BV - Koldingweg 19 - 9723 HL Groningen
Tel. 050 - 549 1610 - Fax 050 - 549 2700 - www.ogp.nl

OGP is wereldwijd marktleider met nu al meer dan 5.400 geïnstalleerde systemen !



zal het regelmodel van hogere orde zijn en is ook de invloed van dynamische effecten des te groter. Die effecten vinden hun oorsprong in de flexibiliteit van actuator en geleidingen en in de massa en stijfheid van het machineframe. Of een ontwerp voor een regelsysteem optimaal is, hangt zeer sterk af van het gedrag van het mechanische systeem, met name van de eigenfrequenties, mogelijke wrijving en stoorkrachten.

Precisiegerichte ontwerpkenmerken

Stijfheid

Behalve dat stijfheid nodig is om een bepaalde kinematische functie te realiseren, is stijfheid ook noodzakelijk om bijkomende effecten als wrijving het hoofd te bieden. Wrijving belast een onderdeel tot de maximaal mogelijke wrijvingskracht is bereikt en er beweging ontstaat. De aan dat proces gekoppelde plaatsonzekerheid noemt men "virtuele speling". Deze is gelijk aan twee keer de maximale wrijvingskracht gedeeld door de stijfheid. Dat betekent dat plaatsonzekerheid is te beschouwen als onzekerheid over de hoeveelheid opgeslagen inwendige potentiële energie. Dus is construeren op stijfheid gelijkwaardig aan construeren op minimale potentiële energie. In veel gevallen betekent dat "hoe groter hoe beter". Maar als het gaat om doelmatig materiaalgebruik, dient tevens de massa en daarmee de kinetische energie te worden geminimaliseerd. In het volgende zullen we de aspecten "geometrie op onderdeelniveau" en "materiaalkeuze" aan een aparte beschouwing onderwerpen.

Geometrie op onderdeleniveau

Sommige bewegingen zijn functioneel en dus gewenst, andere dienen vermeden te worden. Dat laatste omdat ze gepaard gaan met ongewenste kinetische of potentiële energieopslag, met trillingen als typisch voorbeeld. Het onderdrukken van ongewenste bewegingen vraagt om hoge stijfheden in de richting van die bewegingen. Dat kan worden bereikt door materiaal toe te voegen op de juiste plaats en zo weinig mogelijk materiaal te gebruiken op plaatsen waar bewegingen functioneel zijn. Een goed ontwerp is te karakteriseren door uniform verdeelde belastingen met in het ideale geval overal in het materiaal dezelfde spanning.

Een onderdeel wordt of samengesteld uit kleinere onderdelen of gevormd uit vol materiaal. In beide gevallen zijn stijve lichtgewicht-constructies te prefereren. Dat resulteert dikwijls in doosconstructies, die bij voorkeur ter plaatse van de ribben en/of hoeven belast moeten worden. Ook sandwich-constructies met honingraatstructuren of hardschuim winnen terrein. Het uit buizen samenstellen van vakwerken helpt de knikstijfheid en de eigenfrequentie van afzonderlijke staven te vergroten.

Materiaalkeuze

Bij het ontwerpen is de keuze van de materialen van eminent belang voor het uiteindelijke gedrag van de machine. In de ontwerpfasen kunnen diverse criteria in de beschouwing worden

betrokken, zoals materiaalstabiliteit, specifieke stijfheid, homogeniteit, uitzettingscoëfficiënt, temperatuurvereffening enz. Voor deze eigenschappen zijn kengetallen gedefinieerd [10], die bij het ontwerpen van precisiemachines van belang zijn. Zo is voor een precisieslede de specifieke stijfheid E/p een erg belangrijk criterium, omdat hierbij zowel de stijfheid E als de massa p een rol spelen. Ook de inwendige demping is hier van belang.

Specifieke stijfheid

In het algemeen is het bij precisiemachines belangrijker te construeren op stijfheid dan op toelaatbare spanning of levensduur. Dus is de elasticiteitsmodulus belangrijk, evenals de soortelijke massa in het geval grote versnellingen en vertragingen optreden, zoals in computergestuurde meetmachines en wafersteppers. Dat illustreert het belang van een hoge waarde van de verhouding E/p .

Hoewel conventionele metalen als gietijzer, staal en aluminium een niet meer dan matige waarde voor E/p laten zien, hebben ze het voordeel van de toepasbaarheid van gangbare verbindingstechnieken. Graniet heeft een vergelijkbare E/p , maar is moeilijker te verbinden. Het kan vocht opnemen en is daarom minder geschikt voor machines waarin gewerkt wordt met snijvloeistoffen, tenzij een epoxycoating wordt gebruikt.

Keramische materialen worden steeds meer toegepast vanwege hun hoge waarde voor E/p en hun grote weerstand tegen slijtage, corrosie en erosie. De grote broosheid vraagt om een statistische benadering van de breukmechanica. De inherente inhomogeniteit kan een bezwaar zijn, evenals de moeilijke vormgeving en de matige inwendige demping. De combinatie van dunne keramische tegeltjes met dempende lijmverbindingen kan deze bezwaren voor een groot deel ondervangen [2].

Interessant zijn de composietmaterialen die als resultaat van NASA-programma's uit de jaren zestig zijn ontwikkeld. Voorbeelden van sterke vezels met hoge elasticiteitsmodulus zijn koolstof, aramide en polyethyleen. Als reactie daarop zijn de eigenschappen van metalen verbeterd door de introductie van nieuwe legeringselementen en warmtebehandelingen. Van metalen is de elasticiteitsmodulus nauwelijks te beïnvloeden, maar van kunststoffen neemt deze dramatisch toe met de hoeveelheid vezelwapening. Daar komt bij dat de richting ervan kan worden aangepast aan die van de belasting. Wapening met koolstofvezels kan een verbetering van de specifieke stijfheid van kunststoffen met een factor 2,5 opleveren. Kunststoffen hebben daarbij het voordeel van een betere inwendige demping. Wapening van metalen en keramieken levert materiaal op met de soortelijke massa en warmtegeleiding van aluminium en de stijfheid en sterkte van staal. De bewerkingseigenschappen van deze nieuwe materialen zijn echter matig en ze zijn (nog) beperkt leverbaar.

Inwendige demping

De manier waarop een constructie reageert op een tijdafhankelijke verstoring, hangt sterk af van de inwendige demping van het

materiaal in samenhang met de massa en stijfheid. Speciaal de invloed van inwendige demping is moeilijk te kwantificeren en moet daarom empirisch worden bepaald. Een traditioneel materiaal als gietijzer heeft goede dempende eigenschappen, maar gelast staal is in dat opzicht minder gunstig. Recent is met kunststofvezels versterkt beton ontwikkeld, waarvan de inwendige demping vijf tot tien keer beter is dan die van gietijzer. Van dat materiaal is echter de benodigde constructieve massa en het thermisch geleidingsvermogen ongunstiger.

Het is bekend dat materiaalverbindingen via wrijving en microslip bijdragen aan de dempende eigenschappen van constructies, maar dat effect is toch een orde van grootte te klein om een wezenlijke verbetering te geven. Daarom is het vanuit het oogpunt van precisie beter als materiaalverbindingen zich stijf gedragen en niet als glijdend contactvlak.

Machines met roterende onderdelen – bijvoorbeeld slijpschijven – vertonen resonanties bij veelvoudigen van de omwentelingsfrequentie. Het toevoegen van een afgestemd massaveersysteem kan resonantiepieken reduceren tot een tweetal kleinere maxima. Dat werkt alleen in een smalle frequentieband, zodat verandering van de procesomstandigheden de werking van de hulpdemper tenietdoet. Effectiever zijn daarom plaatselijk aangebrachte lagen visco-elastisch dempend materiaal. Die lagen kunnen zowel op als in het te dempen materiaal worden aangebracht.

Lagersystemen

Volle-filmlagers

Statische lagerstijfheid

In de precisietechnologie worden volle-film-lagers, vanwege de lage wrijving en het uitmiddelen van oppervlakteruwheid, vaak toegepast. De stijfheid van oliefilms is ongeveer een factor vijf hoger dan die van vergelijkbare luchtfilms. Hydrostatische lagers hebben ook een betere demping, maar de wrijving en hysteresis is in aerostatische lagers heel wat lager. Daarom worden aerostatische lagers nogal eens toegepast in spindels voor draaibanken en in lichtbelaste machines, zoals meetmachines. Daarentegen is het massastraagheidsmoment van hydrostatische lagerspindels een factor dertig lager, wat deze weer bijzonder geschikt maakt voor toepassing in CNC-machines.

De elasticiteitsmodulus van lucht is ongeveer duizend keer kleiner dan die van olie. Daarom moet de filmdikte van luchtlagers kleiner zijn bij veel grotere afmetingen van het draagvlak. De lagere stijfheid van luchtlagers is te ondervangen door het toepassen van een membraan met passieve drukcompensatie. Ook hydrostatische lagers met passieve drukcompensatie zijn bekend [11].

Dynamische lagerstijfheid

Voor het verbeteren van de dynamische stijfheid van aerostatische lagers kan actieve drukcompensatie worden toegepast. Van de

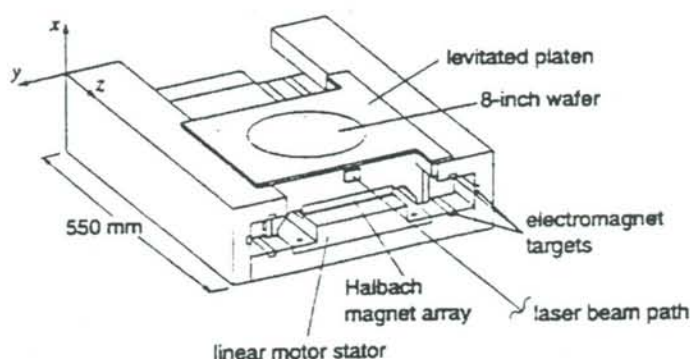
bekende methoden is de regeling van de lagerconiciteit het meest effectief. Daarbij wordt de uitwijking van het - vervormbare - lageroppervlak geregeld door een piezo-elektrische actuator. Bij 100 Hz is een verbetering van de lagerstijfheid met een factor tien bereikt, in vergelijking tot statische stijfheidscompensatie [12].

Actieve magnetische lagers

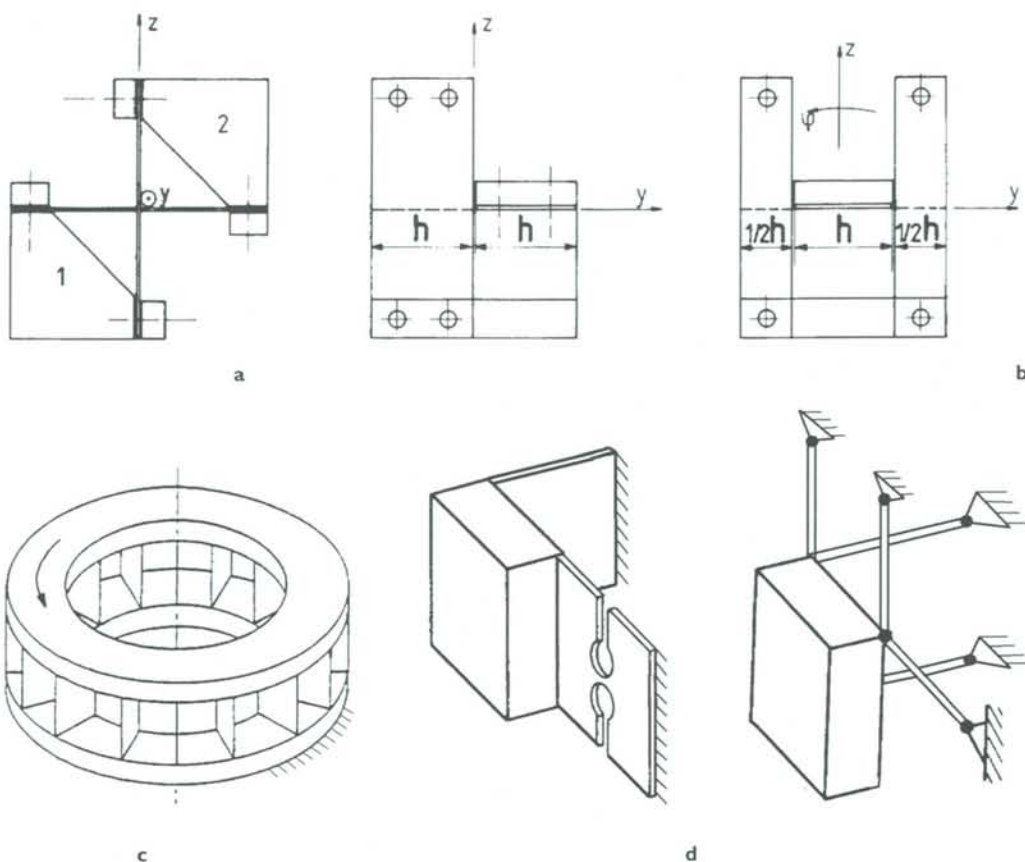
Ondanks de hiervoor beschreven maatregelen blijft het beperken van wrijvingsverliezen een precisietechnologische uitdaging van formaat. Magnetisch zweven is contactloos dus nagenoeg wrijvingsloos en zonder slijtage, zodat magnetische lagers een lange levensduur hebben en nauwelijks onderhoud vragen. De omwentelingssnelheid wordt alleen beperkt door de sterkte van het rotor-materiaal: 400 N/mm² voor weekijzer. Dus zijn omtreksnelheden van maar liefst 350 m/s bereikt. Magnetische lagers zijn speciaal geschikt voor contaminatievrije toepassingen, zoals in vacuüm. Daar komt als extra voordeel bij dat het vrij eenvoudig is de plaats van aangrijping van de lagerkrachten in te stellen en eventuele onbalans te corrigeren. Dat alles moet worden betaald met het nadeel dat magnetisch zweven inherent is aan een labiel krachteenevenwicht. Dus moet de hoogte van de lagerspleet worden gecontroleerd door een teruggekoppeld regelsysteem. Maar door de miniaturisering en toegenomen betrouwbaarheid van elektronica is het aantal industriële toepassingen van magnetische lagers de laatste 15 jaar enorm toegenomen.

In het algemeen vraagt een magnetisch lagersysteem met één graad van vrijheid om vijf regelkringen. Dat maakt de elektronica nogal gecompliceerd en daarom zijn er systemen ontworpen met één of meer niet-geregelde vrijheidsgraden, wat ten koste gaat van de draagkracht en stijfheid.

Het krachtsverloop van magnetische lagers is bij kleine verplaatsingen redelijk lineair, maar bij grote verplaatsingen vertonen zulke lagersystemen open-regelinstabiliteit, zodat veiligheidsvoorzieningen nodig zijn. Bij het toepassen van conventionele



Afb. 9 Een rechtgeleiding met magnetische lagering en lineaire electromotor voor de toepassing in een waferstepper.



Afb. 10 Enkele voorbeelden van bladveerconstructies voor één rotatie-vrijheidsgraad, schematisch als stangenconstructie voorgesteld in d

magnetische materialen als siliciumijzer is de magnetische inductie niet hoger dan 1,5 T, wat een maximale statische krachtdichtheid van 20 tot 40 N/cm² inhoudt, vergelijkbaar met die van luchtlagers.

Er is een methodiek beschreven voor het ontwerpen van complexe magneetsystemen en spoelen [13]. De bijbehorende modellen dienen als gereedschap voor het ontwerpen van lineaire magnetische geleidingen met hoge resolutie en rendement, bijvoorbeeld voor wafersteppers, zie afbeelding 9. Het ontwerp maakt gebruik van een rij permanente magneten, zoals eerder door Halbach voorgesteld voor de toepassing in deeltjesversnellers.

Flexibele elementen

De voordelen van bladveerelementen vergeleken met klassieke scharnierconstructies zijn het ontbreken van speling en glijdende of rollende wrijving. Dus is er ook geen smering of ander onderhoud nodig. Ook is er nauwelijks hysteresis te constateren, al is die in principe wel aanwezig door mogelijke materiaal-inhomogeniteit.

In het algemeen is het niet moeilijk de lineair verlopende aandrijfkraft op te brengen, maar het vermijden van flipflop-verschijnselen door bijvoorbeeld overbepaaldheid in het ontwerp verdient extra aandacht. Uiteraard is de slag beperkt en dient overbelasting te worden voorkomen. Desondanks worden flexibele elementen heel veel toegepast in precisieontwerpen, vooral vanwege hun voorspelbaar gedrag met name wat betreft de reproduceerbaarheid van de beweging.

Van flexibele elementen voor één vrijheidsgraad geeft afbeelding 10 enkele voorbeelden voor rotatie. Afbeelding 11 geeft een voorbeeld van een elastisch "bolscharnier" waarin drie graden van vrijheid – translaties – zijn tegengehouden door staven, in dit geval omgezette bladveren.

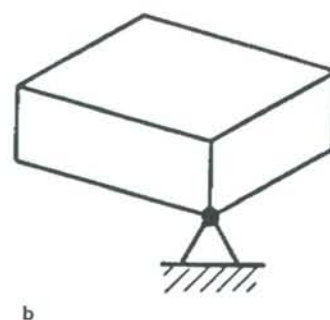
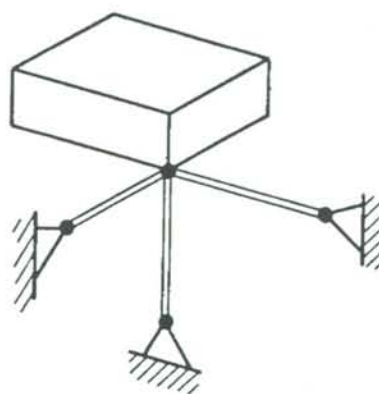
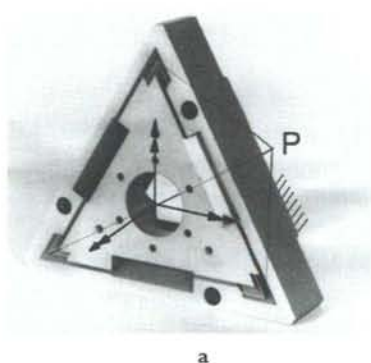
Afbeelding 12 geeft enkele voorbeelden met één vrijheidsgraad – translatie. Als de aandrijfkraft halverwege de bladveren aangrijpt, zoals in afbeelding 12b, zijn de veren vrij van (tegengesteld gerichte) normaalkrachten, maar is er nog wel het bezwaar van een bijkomende verplaatsing loodrecht op de hoofdbeweging. De elastische rechtgeleiding van afbeelding 13 heeft dat bezwaar niet, omdat de constructie volledig symmetrisch is.

Aandrijvingen

In precisie-gereedschapmachines zorgt de aandrijving voor accurate positionering van de sleden, dank zij commando's die CNC-bestuurde interpolatoren genereren. Die aandrijving moet aan een veelheid van eisen voldoen, samen te vatten als snelle responsie met hoge precisie in een breed snelheidsgebied. Teruggekoppelde regelsystemen met precisieingen in real-time zijn nodig om aan de zware eisen te voldoen.

Actuators met kleine slag

Piëzo-elektrische actuators zijn compact en hebben het voordeel van een grote krachtsopbouw, maar helaas is hun slag beperkt. Karakteristiek is bijvoorbeeld een verlenging van 0,1% bij een veldsterkte van 1000 V/mm. Door piëzo-elektrische elementen te stapelen zijn slagen van 100 tot 200 µm haalbaar. De inwendige hysteresis van piëzo-elektrisch materiaal kan 20% van de slag

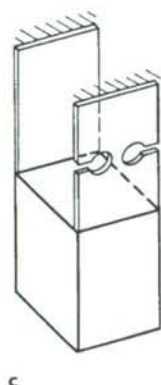
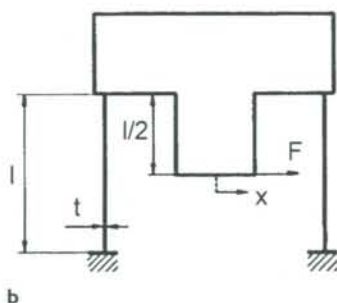
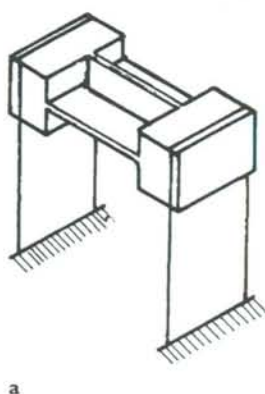


bedragen. Daarom verdient het aanbeveling ook hier teruggekoppelde regeling met meting van de werkelijke verplaatsing toe te passen. De invloed van mechanische hysteresis in contactvlakken is te beperken door gestapelde piëzo-elementen voor te spannen. Als dat gebeurt met een constante belasting, beperkt dat de slag niet. Dat is wel het geval als een verend element wordt toegepast.

Actuatoren met grote slag

Piëzo-stapsystemen

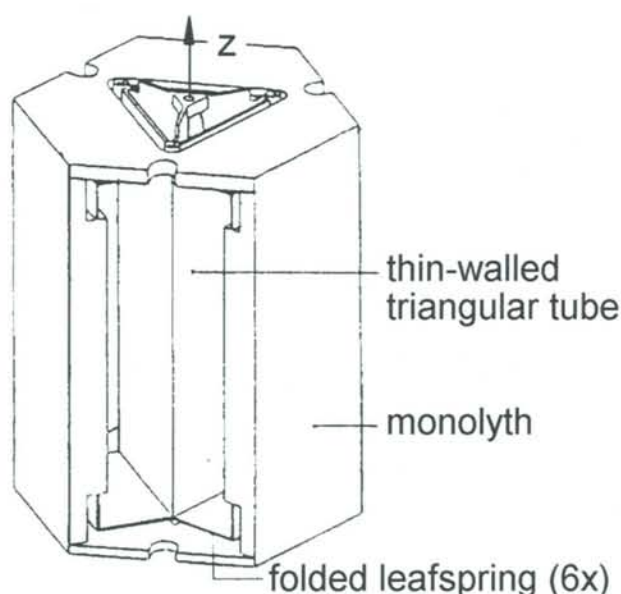
De hierboven geschetste bezwaren van piëzo-elektrische actuatoren zijn voor een groot deel te ondervangen door het toepassen van stapmechanismen, waarop diverse creatieve ontwerpers zich hebben uitgeleefd met als bekendste voorbeeld de zgn. inch-worm. De laatste is zowel toepasbaar voor grote slagen als voor een beperkte slag met nanometer-resolutie. Naast lineaire stap aandrijvingen zijn er ook roterende stap systemen ontworpen.



Afb. 12 Rechtgeleidingen opgebouwd uit bladveren. Door in b de aandrijfkraft halverwege de veren te laten aangrijpen worden normaalkrachten vermeden.

Afb. 11 Een 'bolscharnier' opgebouwd uit gevouwen bladeren.

bijvoorbeeld voor draaitafels en kantelspiegels. Afbeelding 14 laat een draaitafel zien [14] die met een resolutie van $0,1 \mu\text{rad}$ kan worden gepositioneerd bij een stabiliteit van de rotatie-as van enkele nanometers. Drie piëzo-stapsystemen zijn onder hoeken van 120° rondom een luchtgelagerde draaitafel gemonteerd. De stap systemen zijn met behulp van draadvonken uit één stuk massief materiaal vervaardigd. De relatief lage omwentelingssnelheid van 1 omw/min vormt een verdere uitdaging voor de ontwerpers.



Afb. 13 Geheel symmetrische rechtgeleiding, waarbij de bladveren optimale symmetrie hebben.

Elektromagnetische actuatoren

Vandaag de dag worden elektromagnetische actuatoren vooral toegepast in gereedschapsmachines, meestal met mechanische rotatie-translatie-omzetters. De komst van lineaire gelijk- en wisselstroommotoren heeft die omzetters voor een deel overbodig gemaakt. De elektronica voor het regelen van gelijkstroommotoren is goedkoper maar de slijtage van koolborstels is een bekend bezwaar.

Het meest wordt de aloude combinatie van leischroef en moer toegepast als rotatie-translatie-omzetter. De bezwaren van die aandrijving zijn vaak te herleiden tot een uit kinematisch oogpunt onjuiste ophanging van de moer. Maar in een goed ontwerp haalt zo'n aandrijfsysteem een resolutie op submicron-niveau. Het grote voordeel van moer-leischroef-constructies met roterende motor is dat de stijfheid ook groot is buiten het bandbreedtegebied van het regelsysteem. Dat in tegenstelling tot lineaire motoren, waarvan het regelsysteem een buitengewoon grote bandbreedte moet hebben. De speling in leischroefaandrijvingen is te elimineren door de moer voor te spannen, wat helaas ten koste gaat van het rendement door de grotere wrijving en de toenemende virtuele speling. Aandrijfsystemen met kogelomloopmoer hebben daar minder last van, maar vertonen soms verstoringen in het snelheidspatroon door het in- en uitlopen van kogels.

Het gedrag van goed ontworpen wrijvingswiel-aandrijvingen is beter voorspelbaar en reproduceerbaar, dankzij de statisch bepaalde belasting ter plaatse van de contactpunten. Ze zijn daardoor bijzonder geschikt voor de toepassing bij moderne bewerkingsmethoden voor producten met zelfs optische oppervlaktekwaliteit. In de literatuur zijn zulke aandrijfsystemen met nanometer-resolutie beschreven [15].

Hoonmachines van PEMAMO

- Vanaf $\varnothing 0,6$! mm - $\varnothing 70$ mm.
- Z  r grote precisie.
- Z  r bedieningsvriendelijk.
- Herhalingsnauwkeurigheid: 0,001 mm

Verschillende uitvoeringen leverbaar zowel voor grote productieaantallen als voor kleinere series.

Ook handhoonapparaten voor gebruik op de freesbank of boormachine.

MEER INFO?
BEL 010-4950933



Een van de belangrijkste redenen voor het slecht functioneren van de positionering in indirect aangedreven machines - in het bijzonder bij lage snelheid - is het mechanisme tussen actuator en slede. Vandaar dat een directe aandrijving in veel gevallen de voorkeur verdient. Bij zulke systemen, bijvoorbeeld met lineaire motoren, luidsprekerspoel-actuators en hoogkoppel-motoren, is het beslist noodzakelijk meetsystemen met hoge resolutie toe te passen. Zowel voor rotaties als voor translaties zijn die tegenwoordig in ruime mate voorhanden. Gering onderhoud, grote stijfheid, geringe massa en wrijving zijn enkele voordelen van directe aandrijfsystemen. Bezwaren zijn de directe invloed van belastingvari  tes op de motor enerzijds en die van koppelvari  tes op de slede anderzijds. Zulke koppelvari  tes zijn onder andere het gevolg van inhomogeniteiten in de velden van zowel permanente magneten als elektromagnetten. In moderne servomotoren met schijfanker zijn die bezwaren voor een deel ondervangen door toepassing van een groot aantal spoelen.

Sensoren

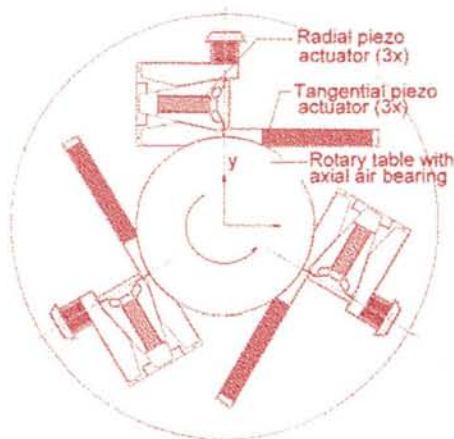
Sensoren in precisiemachines zijn er in diverse soorten, bijvoorbeeld positie-sensoren als essentieel onderdeel van lengtemeetinstrumenten, CCD-camera's in beeldsystemen, temperatuursensoren voor de correctie van thermische fouten. In dit artikel zullen vooral positie- en snelheidssensoren voor positiebesturingen, versnellingsopnemers voor actieve trillingsisolatie en temperatuursensoren voor de compensatie van thermische fouten aan de orde komen.

Digitale positie-sensoren

Laserinterferometers

In een laserinterferometer emitteert een coherente laserbron twee bundels - de referentie- en de meetbundel - die vervolgens samen interfereren. De twee bundels ontstaan in een polarisatie-bundelsplitter of in een amplitude-bundelsplitter. Ter verhoging van de stabiliteit wordt er soms met twee iets verschillende frequenties gewerkt: heterodyne-interferometrie. Een of meer fotodiodes detecteren veranderingen in de optische weg, en wel door het tellen van passerende interferentiebanden. De laatste zijn het resultaat van de interferentie van de beide bundels. Door interpolatie tussen twee interferentiebanden is meting met nanometer-resolutie mogelijk. Aangepaste optische systemen kunnen op deze manier ook hoeken, vlakheid, rechtheid en ruwheid meten.

De precisie van laserinterferometers wordt begrensd door de stabiliteit van de golflengte van het laserlicht, die verandert door de vari  te van de brekingsindex van lucht. Die vari  te is het gevolg van de verandering van temperatuur, druk, vochtigheid, CO₂-gehalte en contaminatie door andere gassen. Door het meten van deze invloedsfactoren is de golflengtevari  te berekenbaar. Een andere foutenbron is het niet-lineair zijn van de interpolatie als gevolg van optische imperfecties. Dat alles betekent dat ook bij laserinterferometrie diverse kalibraties noodzakelijk zijn. Hoewel tegenwoordig nanometer-resolutie van laserinterferometer-syste-



Afb. 14 Uiterst nauwkeurige draaitafel met luchtlagering en piezo-actoren voor besturing van de rotatie en positionering van de as [14].

men geen zeldzaamheid meer is, is de relatieve onnauwkeurigheid door de genoemde oorzaken meestal niet beter dan 10^{-7} .

Linialen

De maatverdeling van linialen wordt gevormd door een zich herhalend patroon van reflecterende, lichtdoorlatende, stroomgeleidende of magnetische materialen in een substraat, met als resultaat een periodiek meetsignaal. De onnauwkeurigheid hangt voornamelijk af van de geometrische afwijkingen van het patroon en ligt in het μm - tot sub- μm -gebied. Conventionele optische encoders – lineair of roterend – berusten op het tellen van Moiré-lijnen met behulp van fotodiodes.

Een resolutie in het nm-gebied is te bereiken met diffractiesystemen met behulp van optische roosters. Daarbij vallen er twee bundels afkomstig van één laser- of LED-bron op het rooster, waarna diffractie met verschillende ordes plaatsvindt. Daarna interfereren beide bundels. Vervolgens telt men tijdens het bewegen van het rooster de passerende lijnen in het interferentiepatroon. Interpolatie is mogelijk door tevens een signaal te genereren met 90° faseverschil. Vergeleken met conventionele optische linialen met 125 lijnen/mm zijn roosterverdelingen tot 2000 lijnen/mm mogelijk. Daarbij wordt de snelheid begrensd door de maximale signaalfrequentie van de elektronica.

Linialen die zijn gebaseerd op magnetische, inductieve of capacitieve meetmethoden hebben resoluties en onnauwkeurigheden die vergelijkbaar zijn met die van conventionele optische verdelingen.

Analoge positiesensoren

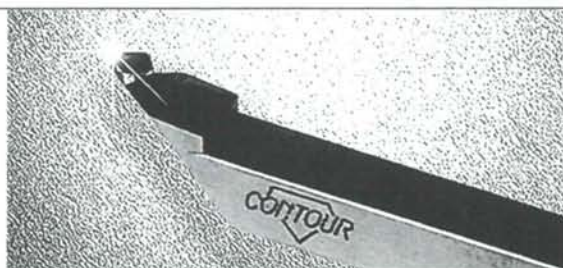
In het algemeen hebben analoge positiesensoren gebaseerd op magnetische-fluxvariatie, wervelstromen en licht een dynamisch bereik (de verhouding van positie-onnauwkeurigheid en –resolutie) van 10^3 tot 10^4 . Alleen analoge capacitieve positiesensoren hebben een met optische linialen vergelijkbaar dynamisch bereik. In afbeelding 15 is voor diverse analoge contactloze positiesensoren het dynamisch bereik uitgezet als functie van de bandbreedte.

Capacitieve sensoren

Wijzigingen van de afstand of overlapping van twee geleidende parallelle platen verandert de capaciteit van de zo gevormde condensator. Met een derde plaat, via een elastische rechtgeleiding gepositioneerd tussen de twee eerstgenoemde, kunnen er door middel van de differentiemethode ook hoeken worden gemeten. Met capacitieve sensoren zijn hoge resoluties – zelfs tot in het picomeergebied – mogelijk, bij een bandbreedte van 100 kHz. Helaas is bij afstandsmeting de slag beperkt tot hoogstens 1 mm en zijn zulke sensoren erg temperatuurgevoelig. Capacitieve sensoren zijn ook geschikt voor het meten van snelheid en versnelling.

Inductieve sensoren

Inductieve sensoren meten de verandering van de inductie tussen twee spoelen afhankelijk van de plaats van een ferromagnetische kern. Daarbij zijn twee configuraties mogelijk. Bij de ene zijn de twee spoelen opgenomen in een brug van Wheatstone. Bij de andere configuratie wordt er een derde spoel toegepast: twee secundaire spoelen bewegen samen ten opzichte van een stationaire primaire spoel. Op deze manier wordt extra informatie over de bewegingsrichting verkregen, en in de middenpositie (de secundaire spoelen aan weerskanten van de primaire spoel) is het systeem temperatuuronafhankelijk. Een groot voordeel van

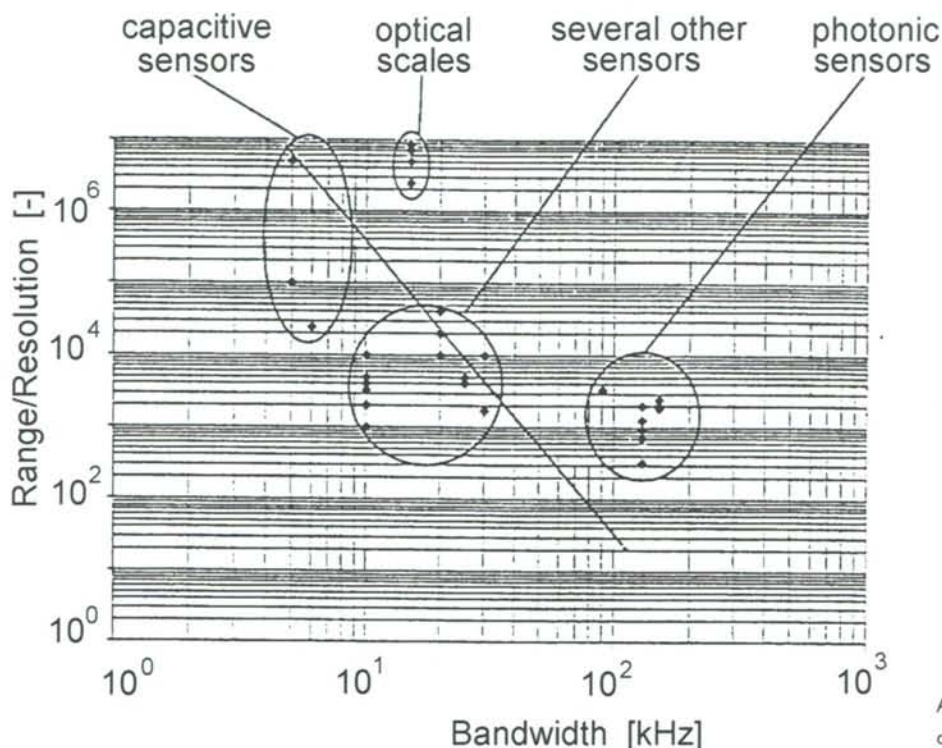


CONTOUR
FINE TOOLING
Diamond Tool Technology

Contour Fine Tooling is specialist op het gebied van monokristallijne **diamantgereedschappen** voor **ultra precisie verspaning**. Onze draaibeitels worden wereldwijd ingezet voor het vervaardigen van componenten (kunststof, non-ferro, IR-kristallen) met hoge eisen aan vormnauwkeurigheid en oppervlaktegesteldheid. De gereedschappen zijn leverbaar met natuurdiamant of synthetische diamant met radiusgrootte tussen $1\mu\text{m}$ en 500mm . Waviness over de snijkant (peak-to-valley) kan gespecificeerd worden tot een minimale tolerantie van $\leq 0,05\mu\text{m}$. Voor veel toepassingen kunnen standaardbeitels ingezet worden, voor uw specifiek probleem ontwerpen wij graag een speciaal gereedschap.

Voor aanvullende informatie kunt u terecht op onze homepage www.contour-diamonds.com.

Contour Fine Tooling BV
Geenhovensdreef 22, 5552 BD Valkenswaard
tel 040-2082363, fax 040-2082313



Afb. 15 Het dynamisch bereik als functie van de bandbreedte voor diverse sensortypen.

inductieve sensoren is hun grote bereik: van 0,1 mm tot ongeveer 100 mm. In een bijzonder geval is een resolutie van 0,1 nm en een onnauwkeurigheid van enkele tiende nanometers bereikt. De bandbreedte is meestal niet hoger dan enkele honderden Hertz.

Wervelstroomsensoren

Een variërend magnetisch veld induceert wervelstromen aan het oppervlak van geleidend materiaal, bijvoorbeeld tot een diepte van 0,1 mm in aluminium. Via het meten van de verandering van de zelfinductie van de spoel die het veld genereert, is de verplaatsing van de geleider te detecteren. Hoewel wervelstroomsensoren een niet-lineair gedrag vertonen, zijn resoluties van enkele nanometers haalbaar. De maximale slag is beperkt tot 10 mm.

Aluminium is een geschikt doelmateriaal, met koper en messing als bruikbare alternatieven. Staal verdient geen aanbeveling vanwege de variabele permeabiliteit als gevolg van microstructuren en oppervlakteverschijnselen. Voordelen van wervelstroomsensoren zijn de ongevoeligheid voor olie en vuil. Nadelen zijn de gevoeligheid voor haarscheuren, inhomogeniteiten en oppervlaktespanningen in het doelmateriaal.

Optische sensoren

Er is een breed scala aan optische sensoren beschikbaar, bijvoorbeeld lasersensoren gebaseerd op driehoeksmeting, sensoren gebaseerd op focussing, vezeloptiek-sensoren en sensoren met fotodiodes en CCD's in rijen. Afhankelijk van het type zijn nm-resoluties bij μm -bereik tot sub- μm -resoluties bij mm-bereik haalbaar.

Snelheidsopnemers

Snelheidssensoren bewijzen goede diensten in servosystemen waarin demping dient te worden geïntroduceerd. Met behulp van luidsprekerspoelen kunnen één dimensionale snelheden worden gemeten. Voor het meten van hoeksnelheden gebruikt men meest-

al tachometers, al dan niet met koolborstels. Het bij luidspreker-spoel- en tachometersystemen geïnduceerde EMK-sigitaal is evenredig met de snelheid. Een lineariteit van 0,1 % is haalbaar. De resolutie en nauwkeurigheid hangen af van de toepassing.

Versnellingsopnemers

De gebruikelijke manier om versnellingen te meten is via de tweevoudige differentiatie van een signaal voor de verplaatsing, afkomstig van rekstrookjes of piëzo-elektrische transducenten. Recentelijk zijn er goedkope halfgeleider-versnellingsopnemers ter beschikking gekomen, o.a. bedoeld voor toepassing in airbags. Voor nauwkeuriger toepassingen worden echter versnellingsopnemers gebruikt met massaveersysteem. Een teruggekoppelde regeling levert een zodanige stroom door een luidspreker-spoel dat de massa in zijn beginstand wordt gedwongen. De kracht en daarmee de stroom door de spoel is in het werkgebied evenredig met de te meten versnelling.

Temperatuuropnemers

Temperatuurdetectoren zijn meestal gebaseerd op weerstandsmeting of op thermokoppels. De weerstandsmeters maken of gebruik van thermistors of van platina als weerstandselement. Thermistors hebben een negatieve weerstandcoëfficiënt. Ze zijn niet-lineair, zeer stabiel en buitengewoon gevoelig. Platina-weerstandsthermometers zijn weliswaar beter lineair, maar veel minder gevoelig. Bovendien is er in tegenstelling tot thermistors vrij ingewikkelde elektronica nodig. Thermokoppels vragen om een stabiele referentie-temperatuur. Hoge precisie is daarbij inherent aan een uiterst nauwkeurige spanningsmeting.

Vervolg 'Precisiegericht ontwerpen' in Mikroniek nummer 6

Simulatie van het dynamische gedrag van aandrijfsystemen met 20-sim

Inleiding

Het simuleren van het gedrag van dynamische systemen is reeds jaren mogelijk op computers. Een van de eerste programma's voor de PC werd op het Laboratorium voor Regeltechniek van de Universiteit Twente ontwikkeld. Dit programma is wereldwijd bekend geworden onder de naam Tutsim. Tutsim is typisch een programma van de eerste generatie, waarbij een model regel-georiënteerd moet worden ingevoerd. Om de complexiteit van grotere modellen in de hand te kunnen houden verschenen aan het eind van de jaren tachtig de eerste programma's van de tweede generatie, waarbij modellen op een grafische manier kunnen worden ingevoerd. Een goed voorbeeld hiervan is Matlab/Simulink, waarbij dynamische systemen met blokschema's worden beschreven. In wezen verschillen blokschema modellen niet veel van regel georiënteerde modellen. Ze beschrijven een oorzakelijk verband tussen ingang en uitgang. Voor fysisch georiënteerde modellen gaat dit niet op, omdat daar sprake is van een energetisch verband. Vandaar dat halverwege de jaren negentig de derde generatie programma's op de markt kwamen, waarbij een fysisch model is opgebouwd uit componenten met energetische verbindingen. Een goed voorbeeld van zo'n derde generatie pakket is "20-sim" ("Twente Sim") dat, net als eerder Tutsim, op de Universiteit Twente is ontwikkeld. Omdat 20-sim ook de traditionele modelvormingsrepresentaties ondersteunt, is het pakket uiterst geschikt voor de modelvorming en simulatie van aandrijfsystemen.

Modelvorming en simulatie

Er zijn diverse methoden voor modelvorming en simulatie van dynamisch gedrag, elk met hun specifieke toepassingen. Voor fysische systemen kunnen we twee belangrijke methoden onderscheiden: de Eindige Elementen Methode (EEM) en de Lumped Parameter Methode (LPM). Bij de eerste methode wordt het dynamisch gedrag van een systeem gesimuleerd door het te modelleren als een set van (ruimtelijke) deel-elementen, waarvan het dynamisch gedrag zeer precies kan worden berekend. Door het systeem op te delen in voldoende deel-elementen kan de gewenste nauwkeurigheid worden bereikt. Bij de tweede methode wordt de dynamische eigenschappen van een systeem gecon-

treerd in discrete punten. De interactie van deze punten geeft dan het dynamisch gedrag van het systeem. Door meer discrete punten te nemen kan de gewenste nauwkeurigheid worden bereikt. Een aantal specifieke verschillen tussen beide methoden van modelvorming zijn weergegeven in tabel 1.

	EEM	LPM
benodigde ontwerp kennis	groot	gering / gemiddeld
simulatiere resultaten	nauwkeurig	redelijk nauwkeurig
benodigde ontwerptijd	groot	gering / gemiddeld
benodigde simulatietijd	groot	gering
fysisch bereik	domein-gebonden	niet gebonden

Tabel 1. Verschillen tussen Eindige Elementen Methoden en Lumped Parameter Methoden.

Eindige elementen methoden vereisen veel detailkennis van het ontwerp (vorm, materiaal, etc.) en zijn niet snel of eenvoudig te veranderen. Lumped parameter methoden daarentegen kunnen reeds vroeg in het ontwerpproces worden gebruikt en leveren snel kentallen op, waarmee het detailontwerp gestuurd kan worden. De factor tijd moet hierbij niet worden onderschat. Alleen een methode die weinig tijd vergt is in staat een snel veranderend ontwerpproces bij te houden en te ondersteunen.

Iconische diagrammen

Er zijn diverse manieren om een fysisch systeem te modelleren en te simuleren. Als we de Lumped Parameter methode gebruiken is de meest gangbare als volgt:

1. Stel het ideaal fysisch model op.
2. Beschrijf van alle componenten van het ideaal fysisch model de dynamische vergelijkingen.
3. Sorteer de vergelijkingen.
4. Representeer de vergelijkingen in een blokschema of een set differentiaalvergelijkingen.
5. Voer het blokschema of de vergelijkingen in een programma in.

6. Compileer het model.
7. Simuleer.

Deze methode is tijdrovend. Zeker als na simulatie blijkt dat het ideaal fysisch model moet worden aangepast. Dan moet namelijk de hele cyclus van voren af aan worden herhaald. Graag zouden we daarom stap 1 tot en met 6 vervangen door:

1. Stel het ideaal fysisch model op.
2. Voer het ideaal fysisch model in een programma in.
3. Compileer het model.
4. Simuleer

Dit kan door gebruik te maken van iconische diagrammen. Deze bestaan uit componenten, equivalent aan die van het ideaal fysisch model, die vermogen aan elkaar overdragen. Dit kunnen we uitleggen aan de hand van een voorbeeld van een massa-veer systeem.



Afb. 1 Model van een massa-veer systeem.

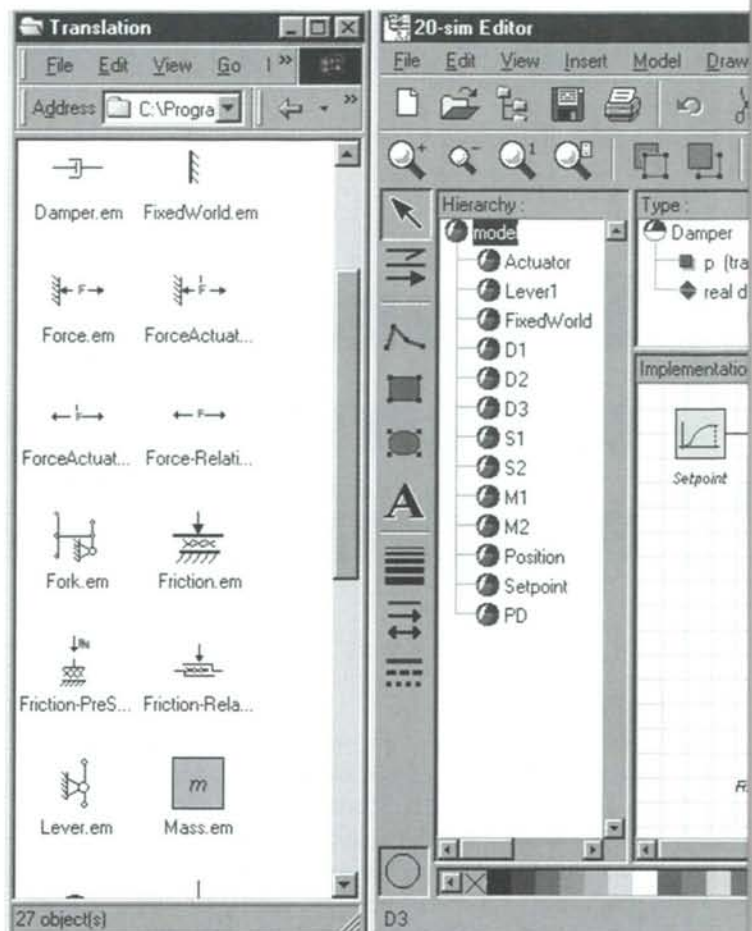
De bewegingsvergelijkingen van de componenten zijn weergegeven in tabel 2. De middelste kolom geeft de traditionele schrijfwijze. De rechterkolom geeft equivalente bewegingsvergelijkingen met als variabelen de kracht en de snelheid. Zoals we uit deze vergelijkingen kunnen afleiden, wordt tussen iedere component twee variabelen uitgewisseld. In de rechterkolom zijn dit kracht en snelheid. Als we deze met elkaar vermenigvuldigen krijgen we vermogen en het vermogen over de tijd geïntegreerd is energie.

vaste wereld	$x_1 = 0$ $F_1 = \text{onbekend}$	$v_1 = 0$ $F_1 = \text{onbekend}$
veer	$F_1 = F_2 = k * (x_1 - x_2)$	$F_1 = F_2 = k * \int (v_1 - v_2)$
massa	$F_2 = m * a_2$	$F_2 = m * d v_2 / dt$

Tabel 2 Bewegingsvergelijkingen van de diverse componenten van een massa-veer systeem.

Door de bewegingsvergelijkingen van de diverse componenten te combineren kunnen we differentiaalvergelijkingen opstellen die samen het gedrag van het gehele systeem beschrijven. Dit kan redelijk eenvoudig automatisch worden gedaan als we de componentvergelijkingen van de rechterkolom gebruiken.

In 20-sim kunnen iconische diagrammen worden ingevoerd zoals het model in afbeelding 1. Er is in 20-sim een grote bibliotheek met componenten aanwezig, waarvan de bewegingsvergelijkin-



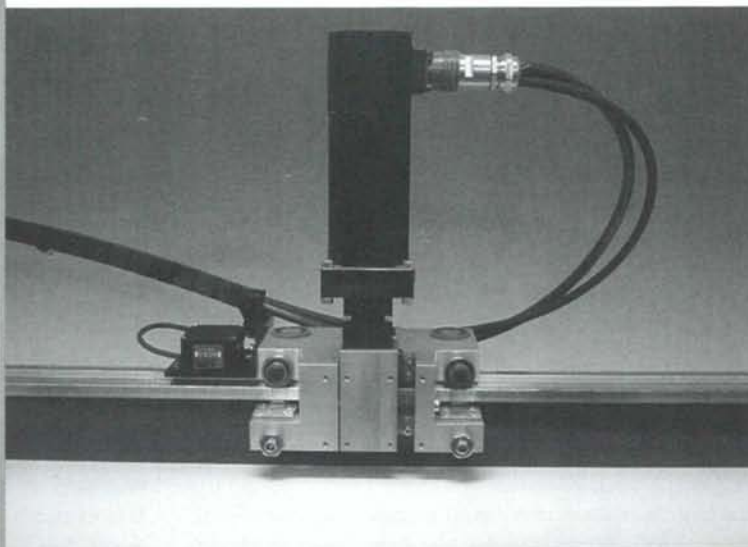
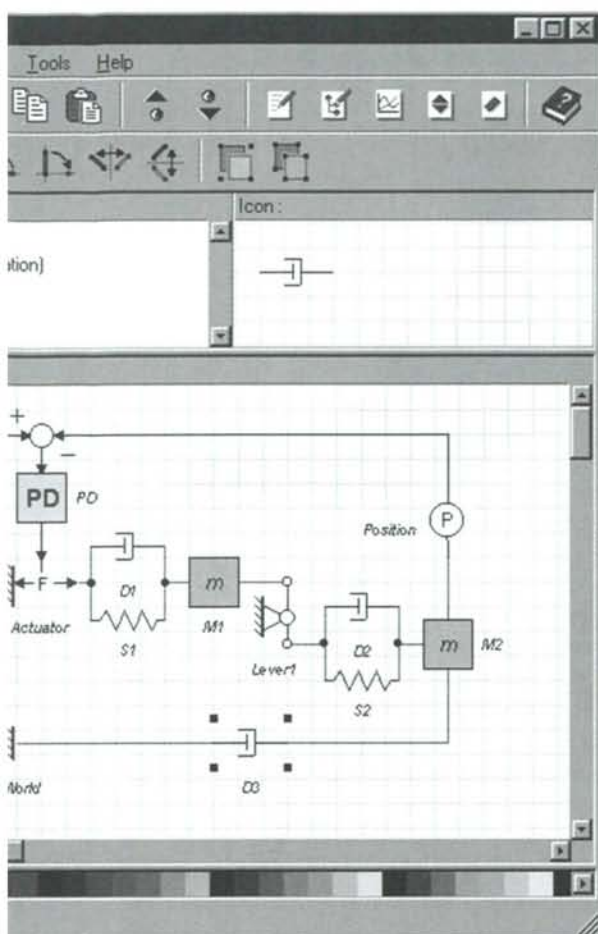
gen met standaardvariabelen beschreven zijn. Door deze componenten met elkaar te verbinden wordt een model opgesteld. Uit de componentvergelijkingen en de manier waarop de diverse componenten met elkaar zijn verbonden leidt 20-sim automatisch de complete set differentiaalvergelijkingen in berekenbare vorm af.

Werking en mogelijkheden van 20-sim

20-sim is een volledig geïntegreerd pakket voor de modelvorming en simulatie van dynamische systemen. De software werkt op alle Windows platforms. 20-sim ondersteunt modelvorming met vergelijkingen, blokschema's en iconische diagrammen of een combinatie van die drie en is daarmee zeer geschikt voor aandrijfsystemen. Aandrijfsystemen bestaan naast fysische componenten vaak ook uit regelsystemen, die met blokschema's goed beschreven kunnen worden.

Na het opstarten van 20-sim verschijnt een editor en een componentenbibliotheek. De componenten kunnen door het verslepen met de muis (drag and drop) vanuit de bibliotheek in de editor geplaatst worden. Door het plaatsen van verbindingen tussen de diverse componenten, wordt een model gemaakt.

In de editor worden vier vensters getoond. Het linker venster toont het gehele model met de complete hiërarchie van de componenten. Een selectie in deze hiërarchie brengt de gebruiker steeds bij de juiste component. Het venster midden boven toont steeds de interface van de geselecteerde component. In de interface wordt gedefinieerd welke verbindingen een component met



Afb. 2 Modellenbibliotheek (links) en modeeditor (rechts).

Afb. 3 De lineaire actuator van VarioDrive.

andere componenten kan hebben en de parameters die bij de component horen. In afbeelding 2 zien we een poort p van het translatie domein en een parameter d van de geselecteerde component (demper D3). Het venster rechts boven, toont het icoon van het geselecteerde component. Dit is het plaatje waarmee een component getoond wordt. Deze is door de gebruiker, via een teken-editor eenvoudig aan te passen. Het grote venster aan de onderzijde tenslotte is de model-editor waarin het eigenlijke model gemaakt wordt.

Nadat het complete model is ingevoerd moet het gecompileerd worden. In 20-sim gaat dit met een druk op de knop en volledig automatisch. Indien het model correct bevonden is kan er een simulatie uitgevoerd worden. Hiervoor beschikt 20-sim over een simulator window dat automatisch opstart na het compileren. In deze simulator kan de gebruiker de resultaten van een simulatie tonen in een grafiek (zie afbeelding 8) of in een 3D visualisatie (zie afbeelding 5).

Analyse

In 20-sim is er een groot aantal mogelijkheden om het gedrag van een model te analyseren:

1. Inspectie variabelen: op ieder moment kan een simulatie gestopt worden om de momentane waarde van elke modelvariabele te inspecteren. Omdat 20-sim een geïntegreerd programma is, kan dit zowel in de simulator als in de editor (door met de muis naar verbindingen of vergelijkingen te wijzen).

2. Meervoudige simulaties: de gebruiker kan een groot aantal simulaties achter elkaar draaien (parameter sweeps, optimalisatie, monte carlo analyse, controller tuning, curve fitting etc.).
3. FFT-analyse: van iedere variabele die in een grafiek getoond is, kan ook de signaalinhoud in het frequentiedomein getoond worden.
4. Linearisatie: niet-lineaire modellen kunnen met een druk op de knop gelineariseerd worden. Het resultaat is een overdrachtsfunctie, waarvan direct de stapresponsie, Bode-, Nyquist-, Nichols- en Pole-Zero-plots getoond kunnen worden.

Modellen Bibliotheek

Modellen worden in 20-sim opgeslagen op file. De bibliotheek is daarom een collectie directories en files die door de gebruiker eenvoudig aangepast en onderhouden kan worden. Vanuit 20-sim kan op ieder moment, elk gewenst model aan de bibliotheek toegevoegd worden. Vanuit een willekeurige Windows Explorer kunnen modellen via drag and drop in de editor geplaatst worden.

Indien een model-onderdeel nodig is dat nog niet in de bibliotheek aanwezig is, moet dat zelf gedefinieerd worden. Dit kan op eenvoudige wijze door een bestaande component te nemen en de inhoud daarvan aan te passen. Maar er kan ook een geheel nieuwe component gedefinieerd worden. De gebruiker heeft altijd de keuze of de implementatie van zijn component via vergelijkingen gedefinieerd wordt, of grafisch (blokschema, iconisch diagram).

Eenheden

20-sim werkt intern met SI-eenheden en -grootheden. Extern kan elke gewenste eenheid gebruikt worden. Als bijvoorbeeld een gebruiker een parameter opgeeft in omwentelingen per minuut

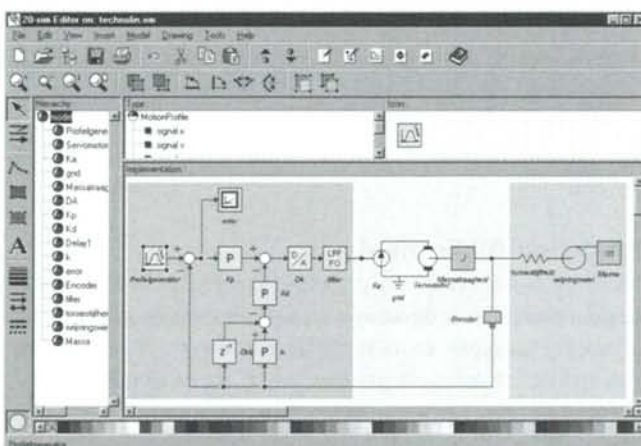
zal deze intern door het programma worden omgezet naar radianen per seconde. Net zo kan de gebruiker na simulatie beslissen de uitvoer niet in meters per seconde te tonen maar in mijlen per uur. Deze optie maakt het eenvoudig, om modellen uit te wisselen tussen Amerikaanse en Europese gebruikers. Het model blijft gelijk, maar iedere gebruiker kan de eenheden van zijn keuze bepalen. De definitie van eenheden, grootheden en fysieke domeinen staan opgeslagen in een file. Deze file kan door de gebruiker naar keuze uitgebreid worden met nieuwe domeinen, eenheden en grootheden.

Compileren

Tijdens het compileren wordt een aantal controles uitgevoerd die de gebruiker waardevolle aanwijzingen geven indien het model niet correct is:

1. Syntax (zijn de componenten correct ingevoerd en aangesloten);
2. Domein (zijn de diverse fysieke domeinen correct op elkaar aangesloten);
3. Eenheden (kloppen de onderliggende vergelijkingen qua eenheden).

Daarnaast wordt een aantal slagen uitgevoerd om het model zo eenvoudig mogelijk berekenbaar te maken. Daartoe beschikt 20-sim over een aantal algoritmes, die in staat zijn vergelijkingen zodanig te manipuleren zodat de meest efficiënte simulatie code wordt afgeleid.



Afb. 4 Het dynamische model van de lineaire actuator.

Technolin

Een voorbeeld van modelvorming met 20-sim van een aandrijfsysteem is de lineaire actuator "Technolin" van het bedrijf VarioDrive (zie afbeelding 3). Deze actuator bestaat uit een elektromotor die via een wrijvingswiel een lineaire beweging opwekt. De motor wordt vanuit een digitale regelaar aangestuurd door middel van stroomsturing.

Het bijbehorende dynamische model is getoond in afbeelding 4. Het is volledig opgebouwd uit standaard bibliotheek componen-



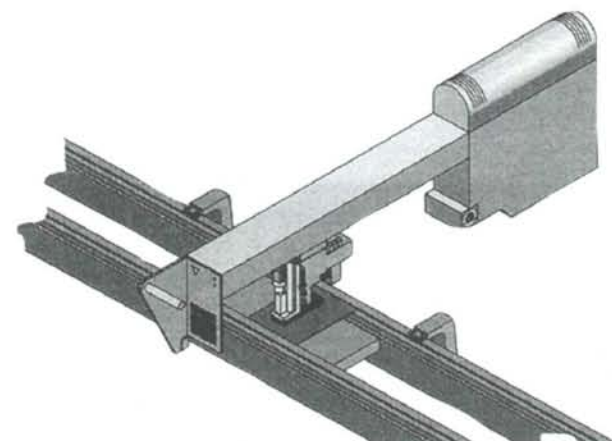
Afb. 5 3D-animatie van de lineaire actuator.

ten. Een profielgenerator levert een stuursignaal aan een digitale regelaar. Het analoge regelsignaal wordt gefilterd met een 1^e orde laagdoorlaatfilter en toegevoerd aan een stroomgestuurde elektromotor. Aan de uitgaande as van de motor bevindt zich een digitale encoder die de snelheid terugvoert naar de regelaar. Het mechanische gedeelte van het model bestaat uit een torsieslapper met een wrijvingswiel en eindlast.

Zoals afbeelding 4 laat zien kunnen diverse modelrepresentaties naast elkaar gebruikt worden. Blokschema's voor de regelaar en iconische diagrammen voor de fysieke componenten van de actuator. Bij het model is een 3D animatie gemaakt (zie afbeelding 5).

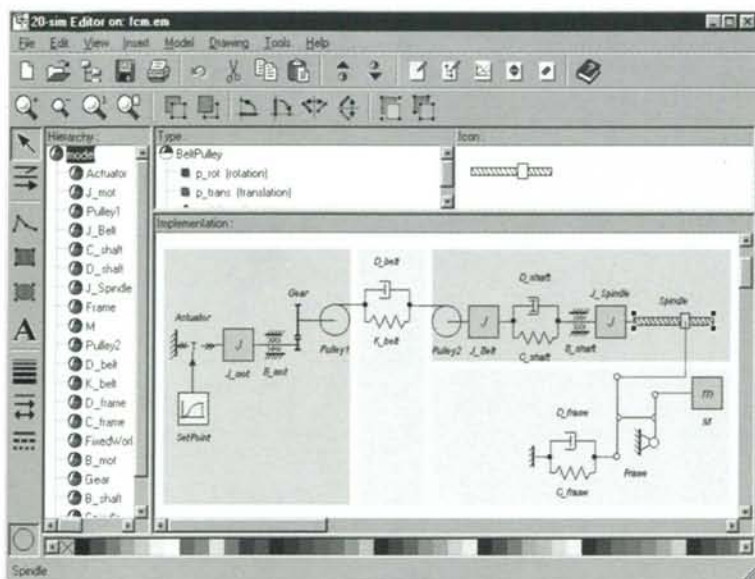
Flexible Component Mounter

Een tweede voorbeeld van modelvorming met 20-sim is de Flexible Component Mounter van Philips EMT. Dit is een pick-and-place unit voor elektrische componenten. Eén module van deze unit (zie afbeelding 6) is verantwoordelijk voor de beweging in x- en z-richting, waarbij de x-richting de grootste slaglengte heeft en de meest kritische richting is wat betreft fouten in de positionering.



Afb. 6 De Flexible Component Mounter van Philips.

Het bijbehorende dynamische model is getoond in afbeelding 7. Het is opgebouwd uit standaard bibliotheek componenten. De inhoud van enkele componenten is aangepast om de specifieke

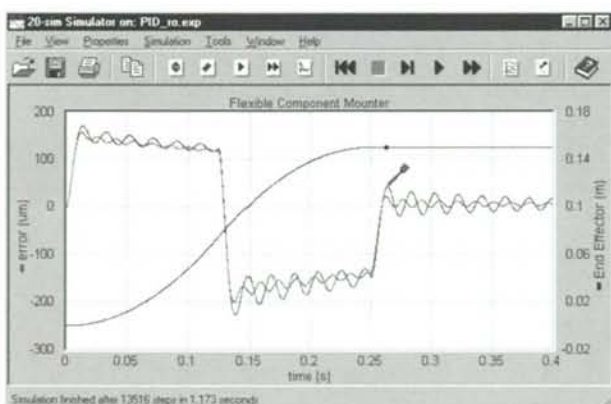


Afb. 7 Dynamisch model van de Flexible Component Mounter (x-richting)

kenmerken van de module beter te representeren. Een profielgenerator levert een stuursignaal aan een geregelde elektromotor. De motor met regeling is voldoende stijf geacht en daarom als ideale actuator weergegeven. Via een tandwielreductie en tandriem overbrenging wordt een spindel met kogelomloopmoer aangedreven, die de rotatie omzet in een lineaire beweging.

Zoals afbeelding 7 laat zien is bij dit model geheel gebruik gemaakt van iconische diagrammen. Een simulatieresultaat van dit model is getoond in afbeelding 8.

Zoals de grafiek laat zien is de dynamische plaatsfout (fout na beëindigen van de beweging, zie pijl) groter dan 40 micrometer. Een gevoeligheidsanalyse, die met 20-sim eenvoudig is uit te voeren, laat zien dat de dominante stijfheid in het frame te vinden is. Door enkele aanpassingen kan de frame stijfheid verhoogd worden van 2e6 N/m naar 3.3e6 N/m. Het resultaat in afbeelding 8 (grafiek net onder de pijl) laat nu een plaatsfout zien van minder dan 25 micrometer.



Afb. 8 Simulatie resultaten van de Flexible Component Mounter.

Referenties

VarioDrive, Croonenburgh 26a, 3261 RG Oud-Beijerland,
Tel: 0186-622 301
Philips EMT, Postbus 218, 5600 MD Eindhoven,
Tel: 040-2732887
Koster, M.P.: Het dynamisch gedrag van constructies en
mechanismen, dictaat 113137, Universiteit Twente
20-sim: <http://www.20sim.com>

Auteursnoot

Ir. C. Kleijn is directeur van Controllab Products B.V.
Controllab Products is de maker van het modelvormings- en
simulatieprogramma 20-sim. Tevens is dhr. Kleijn werkzaam
als consultant op het gebied van modelvorming en simulatie
van dynamische systemen. Voor meer informatie kunt u con-
tact met hem opnemen: tel 053-4893096, fax: 053-4892223,
e-mail: info@20sim.com, Internet: <http://www.20sim.com>

micro  montage

micro assemblage equipment, services en technologie

- ▶ turn-key assemblage systemen
- ▶ micro-verbindingstechnologie / apparatuur
- ▶ productdrager transportsystemen
- ▶ cleanroom technologie
- ▶ industriële vision systemen
- ▶ toevoersystemen
- ▶ precisie handling

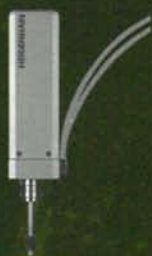
**geautomatiseerde assemblage
systemen en deelsystemen**

+31 35 602 64 00 • fax +31 35 602 72 00

p.o. box 3108 • NL-3760 DC SOEST • e-mail: info@micromontage.nl • www.micromontage.com

- hoekmeetsystemen
- lengtemeetsystemen
- contourbesturingen
- digitale uitlezingen
- meettasters
- impulsgevers

*waarom moet men van
deze meettasters houden?*



Soms is het liefde op het eerste gezicht. Bijvoorbeeld de CERTO meet-
taster van HEIDENHAIN. Diegene die hem eenmaal in zijn hart gesloten
heeft, zal hem altijd trouw blijven. Ongeacht voor welke toepassing. Want
de CERTO meettaster zorgt met de hoogste nauwkeurigheid voor de herleid-
baarheid naar de standaard. Ook over lange meetwegen van 25 of 60 mm, met
een zeer kleine meetonzekerheid van +/- 50 nanometer. Op de CERTO kunt u zich
altijd en volledig verlaten. En dat is nou precies wat hem zo geliefd maakt.
HEIDENHAIN NEDERLAND B.V., Postbus 107, 3900 AC
Veenendaal, Tel: (03 18) 54 03 00, Fax: (03 18) 51 72 87
E-mail: verkoop@heidenhain.nl, <http://www.heidenhain.nl>

**Incrementele
meettasters**

HEIDENHAIN