Mikroniek

VAKBLAD OVER PRECISIETECHNOLOGIE

JAARGANG 41 - NUMMER 3

6 Symposium "Toekomst van de Precisietechnologie"
100 jaar Leidse Instrumentmakers School

14 Grondslagen nader bekeken

23 Van Eijck benoemd tot hoogleraar Advanced Mechatronics
Samenvatting van Van Eijcks intreerede op 22 maart jongstleden

MIKRONIEK IS HET OFFICIELE ORGAAN VAN DE NVPT

Visit our web site:
www.newport.com

Newport®

De M-IMS serie,

Newport's gemotoriseerde high precision sledes

Grensverleggende prestaties.

- Slaglengte 300 tot 600 mm
- Resolutie 1,25 µm
  (0,1 µm met lineaire encoder)
- Herhaalnauwkeurigheid 1,25 µm
  (0,5 µm met lineaire encoder)
- Aangedreven door servo- of steppermotor
- Maximum snelheid 200 mm/sec
- Aluminium constructie
- Belasting tot 60 kg
- 20.000 uur MTBF

Neem contact op met Newport voor meer informatie of voor uw catalogus.

Ideaal voor slaglengtes van 300 tot 600 mm

De nieuwe M-IMS serie is een aanvulling op de M-ILS serie voor wat betreft hoge positioneernauwkeurigheid voor langere slaglengtes (300 mm tot 600 mm). De serie is ontworpen om aan uw hoogste eisen te voldoen in resolutie, herhaalnauwkeurigheid, kosten, snelheid en betrouwbaarheid en geeft een nieuwe impuls aan prestaties voor zowel industriële- als ook research- applicaties.

Kies de M-ILS serie voor slaglengtes van 50 tot 250 mm

- Slaglengte 50 tot 250 mm
- Resolutie 0,5 um
- Herhaalnauwkeurigheid 1,5 um
- Aangedreven door servo- of steppermotor
- Maximum snelheid 100 mm/sec
- Aluminium constructie
- Belasting tot 25 kg
- 20.000 uur MTBF

Newport heeft een breed scala aan motion controllers ontworpen om de hoge positioneernauwkeurigheid van onze lineaire en rotatie tafels te waarborgen en kan voorzien in een exacte afstemming op uw wensen en eisen.

MM4006

ESP6000

UNIDRIV6000

ESP300

ESP100

AD-040110-NL

Newport B.V. – Tiranastraat 25 – NL-3404 CJ IJSSELSTEIN
Telefoon: 030 659 2111 – Telefax: 030 659 2120 – e-mail: netherlands@newport-nl.com

3
Mikroniek - 2001

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:
Twin Design bv
Postbus 317
4100 AH Culemborg
Telefoon: 0345-519525
Fax: 0345-513480
E-mail: mikroniek@twindesign.nl

Uitgever:
Andries Harshagen / Renate Verschoor

Abonnementen:
Twin Design bv, Culemborg

Abonnementskosten:
Nederland: fl. 120,- per jaar ex BTW
Buitenland: fl. 150,- per jaar ex BTW

Hoofdredactie
Dirk Scheper

Redactiesecretariaat/eindredactie
Mikroniek/ Renate Verschoor
Twin Design bv
E-mail: redactie@twindesign.nl

Advertentie-acquisitie:
Waterfront media
Henk van der Brugge
Tel: 06-29574666 of 078-622 7770

Secretariaat NVPT
Parallelweg 30
Postbus 70577
5201 CZ Den Bosch
Tel: 073-6233562
Fax: 073-6441949
E-mail: office@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 **IOP Precisietechnologie**
Magneetlagering voor ultra-precisie productieprocessen

6 ***100 jaar Leidse Instrumentmakers School***
Symposium "Toekomst van de Precisietechnologie"
Op 1 april bestond de Leidse Instrumentmakers School (LiS) 100 jaar. Aanleiding voor de NVPT om op 4 april in samenwerking met de LiS het symposium "Toekomst van de Precisietechnologie" te organiseren. Dit artikel is een samenvatting van dat symposium.

14 **Grondslagen nader bekeken**
Ongeveer 300 jaar geleden lanceerde Robert Hooke zijn beroemde "Wet van Hooke" en hij zal zich waarschijnlijk niet gerealiseerd hebben welke impact zijn wet zou hebben…

23 **Van Eijck benoemd tot hoogleraar Advanced Mechatronics**
Samenvatting van Van Eijcks intreerede op 22 maart jl.

33 **Productinfo**

33 **Actueel**
Vooraankondiging euspen congres, 26 tot 30 mei 2002, TU Eindhoven

34 **Verenigingsnieuws**

editorial

Van de voorzitter van de NVPT

Donderdag 10 mei jongstleden vond een geanimeerde Algemene Ledenvergadering plaats in het gebouw van TNO Technisch Physische Dienst. Circa 50 leden vanuit al onze gelederen (jong en oud; academici en vaklieden) hebben interactief aan deze vergadering deelgenomen. Belangrijk is dat de vereniging na enige nare ervaringen met een failliet gegane partner in het branchecentrum voor precisietechnologie weer enthousiast de toekomst tegemoet ziet. Met name willen we graag een beperkt aantal grotere evenementen (mede-)organiseren in plaats van een groot aantal beperkte bijeenkomsten. In het najaar staat de beurs Precisietechnologie te wachten waar een groot aantal precisietechnologiebedrijven zich presenteren, naast internationale sprekers, onder auspiciën van het Mikrocentrum.
Besloten is te stoppen met het concept van permanente werkgroepen. We gaan voor opkomende enthousiaste initiatieven tot activiteiten, maar dan wel projectmatig en dus eindig.
Daarnaast willen we graag verbindingen leggen naar precisiegerelateerde activiteiten, ook in samenwerking met de VPT, de Bond voor Materialen, de FME, Syntens en anderen.
In mei 2002 dragen we bij aan de door de TU Eindhoven naar Nederland gehaalde Euspen (zie verderop in deze Mikroniek).
Ons secretariaat wordt nu samen met de VPT en de Bond voor Materialen gevoerd aan de parallelweg 30 te Den Bosch.
George van Drunen heeft afscheid genomen van zijn bestuurstaak. Zijn jarenlange bijdrage aan de vereniging heeft ons doen besluiten hem het erelidmaatschap toe te kennen. Tevens zijn Ko van der Lubbe en Hisko Baas afgetreden. We danken ook hen voor hun bijdragen. Willem Hoving van Philips CFT en Theo de Vries van de Universiteit Twente zijn tot het bestuur toegetreden. Joris Gonggrijp neemt de taak van penningmeester op zich. Ook hebben we zicht op een nieuwe secretaris. Deze wil de uitdaging aangaan om de website verder uit te bouwen tot een levendige site waar precisietechnologen vaak gebruik van maken. Samen met Jaap Verkerk die daar al mee gestart was, moet dat gaan lukken.
Kortom een (bijna) schone lei (afhandeling van een faillissement duurt helaas lang), veel enthousiasme en nieuwe mensen.
Heb je ook ideeën? Mail dan naar Office@NVPT.nl

Hans Krikhaar
Voorzitter NVPT

Magneetlagering voor ultra-precisie productieprocessen

Projectnummer: IPT00110

Achtergrond

Indien we de schrijfdichtheid van een CD, DVD en DVR masteringsmachines verder willen verhogen dan is de rondloop-nauwkeurigheid van de rotor en de daarop bevestigde moederplaat de belangrijkste beperking. Bij een rotatiesnelheid tot 75 Hz bestaan er geen extreem nauwkeurige roterende systemen. Een non repetitive run out (NRRO) beter dan de huidige 20 nm is een vereiste indien we de spoordichtheid verder willen verhogen tot 0,3 (m of meer.

Doelen

- verbeteren van de stand der techniek en de praktische toepasbaarheid van magnetische lagering en aandrijving in de precisietechnologie; zowel roterend als translerend.
- studenten interesseren voor en opleiden tot mechatronisch ontwerper;
- ontwikkelen van kennis en vaardigheid voor het realiseren van nauwkeurige, snelle en goedkope (elektromagnetische) systemen.

Intensieve samenwerking met anderen vergroot het aantal betrokken onderzoekers, evenals de beschikbare kennis en faciliteiten. Als carrier dienen de CD / DVD mastering systemen zoals geproduceerd door de firma Toolex. De uitdaging ligt in het terugbrengen van de non repetitive run out (NRRO) van 20 nm tot 1 nm.

Aanpak

Het target van nm-nauwkeurigheid kan alleen gerealiseerd worden wanneer alle deelaspecten en hun onderlinge relatie zijn geoptimaliseerd. Het onderzoek betreft systeem design concepten, architectuur, error budgettering, elektromagnetisme, cogging forces, non-linear control, MIMO, sensoren, etc.

Er wordt gestart met drie deelopdrachten:

- mechatronisch ontwerp roterend elektromechanisch systeem, met alle deelaspecten;
- geavanceerde digitale regelingen en embedded, non-linear software;
- realiseren en integreren van meetsystemen voor bedoelde toepassingen.

Er wordt een politechnisch team geformeerd met daarin de disciplines: elektromechanisch ontwerpen, systeem en regeltechniek, fysica, elektronica en informatica. Ondersteuning en begeleiding vindt plaats vanuit de betrokken bedrijven en vanuit meerdere secties en faculteiten binnen de TUD en de TUE.

Beoogd resultaat

- werkende rotor met nm-NRRO;
- veel kennis over integraal mechatronisch ontwerpen en in het bijzonder magnetisch gelagerde en magnetisch aangedreven systemen;
- een swingende topclub Advanced Mechatronics met een wervende uitstraling naar studenten waar onderzoek plaatsvindt in nauw overleg met het bedrijfsleven.

Uitvoering

2 aio's en 1 post-doc gedurende 4 jaar
Totale projectkosten *f* 1,245,804

Projectteam

Prof.dr.ir. J. van Eijk, ir. J.W. Spronck,
Advanced Mechatronics, faculteit Ontwerp Constructie en Productie, TU Delft.

In samenwerking met prof. O.H. Bosgra (TUD), dr. M. Tichem (TUD), prof. J. Compter (TUE).

E-mail: j.vaneijk@wbmt.tudelft.nl

100 jaar Leidse Instrumentmakers School

Symposium "Toekomst van

Op 1 april bestond de Leidse Instrumentmakers School – kortweg LiS – honderd jaar. Een goede aanleiding voor de NVPT om op 4 april in samenwerking met de LiS het symposium "Toekomst van de Precisietechnologie" te organiseren. Dat symposium was tevens een reactie op een van de aanbevelingen uit de NVPT-bedrijvenenquête uit 1999: "Brede PT-promotieactiviteiten door de NVPT in samenwerking met industrie, werkgevers en overheid" [1]. En het symposium bood de deelnemers een uitstekende gelegenheid de gebouwen en het instrumentarium van de vermaarde instrumentmakersschool – die werd gesticht door "onze" Nobelprijswinnaar Heike Kamerlingh Onnes – nader te bekijken.

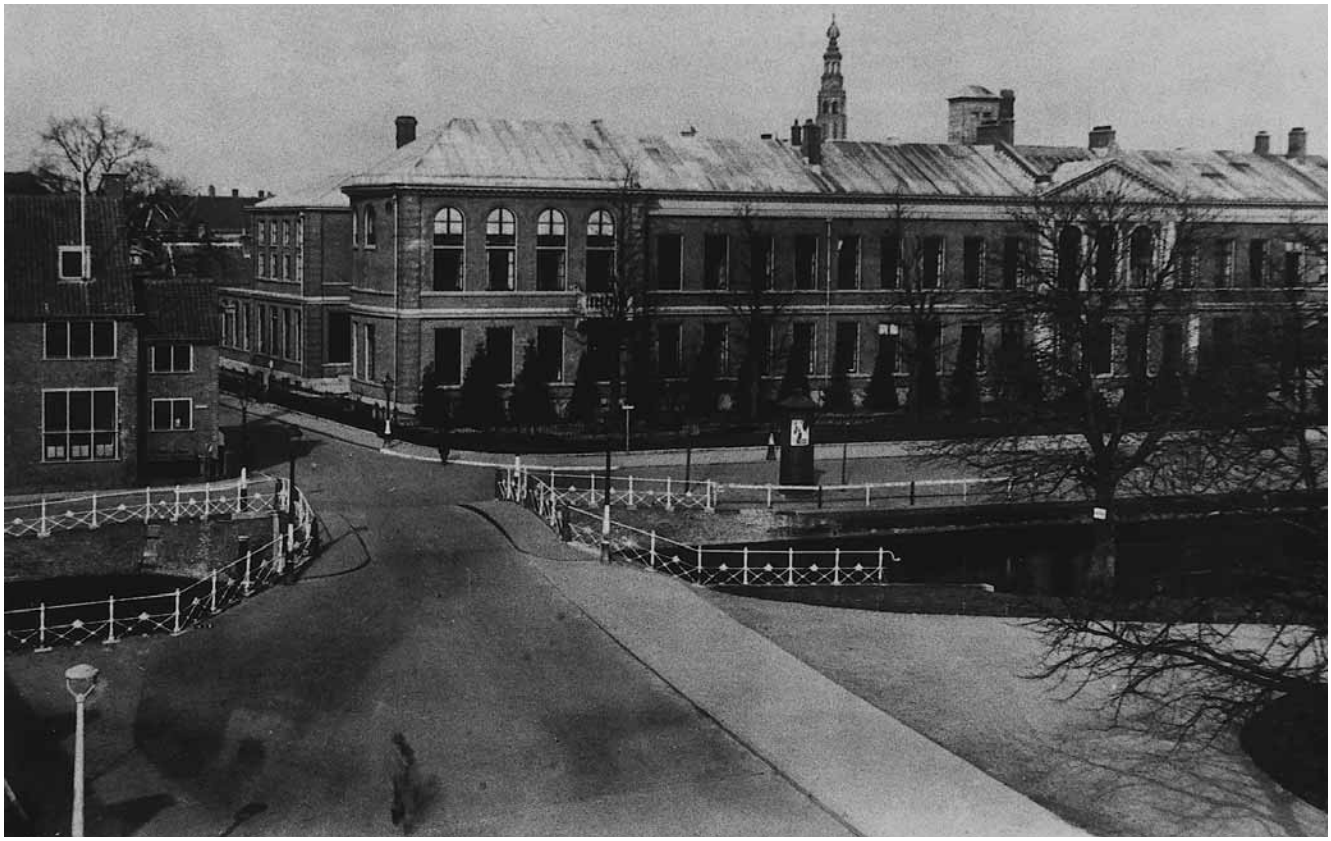
• *Frans Zuurveen* •

Dr. ir. Hans Krikhaar heet de aanwezigen welkom en bedankt de LiS in de persoon van directeur Joris Gonggrijp hartelijk voor de prima organisatie en het beschikbaar stellen van de faciliteiten. Krikhaar stelt zichzelf voor: hij is zowel voorzitter van de NVPT, als ontwikkel-manager van Special Applications van ASML in Veldhoven, dat – zoals bekend – zeer succesvol is in het ontwerpen en maken van wafer steppers voor de IC-industrie. Hans stelt de vraag of deze bijeenkomst een LiS- of een NVPT-symposium is en geeft een diplomatiek antwoord: "Beide".

Krikhaar: "Nederland heeft door hightech-industrie en bijbehorende research altijd een vooraanstaande rol gespeeld in de fijnmechanica en is daardoor op dit moment een competitieve speler in de wereld van de precisietechnologie. Maar de vraag is of Nederland dat in de toekomst zal blijven. Gaan we in dit land wel goed om met het vakgebied precisietechnologie?"

De sprekers ir. George de Haan, manager van de Mechanization Department van Philips Lighting in Eindhoven, Nico Grootenboer, directeur van het fijnmechanisch bedrijf BIHCA Precision in Winterswijk, prof. Joost Frenken, hoogleraar in het vakgebied Interface Physics in het Kamerlingh Onnes Laboratorium van de Universiteit Leiden en dr. P.M. op den Brouw van het Directoraat-generaal Innovatie van het Ministerie van Economische Zaken geven daarna ieder hun eigen visie op de door de NVPT-voorzitter aangesneden problematiek. In dit verslag zullen we de betogen van de vier sprekers en de daarna gevoerde forumdiscussie enigszins

de Precisietechnologie”



De Leidse Instrumentmakers School aan het begin van zijn bestaan.

beknopt weergeven. Later zal er in dit tijdschrift wellicht nog gedetailleerder worden ingegaan op interessante precisietechnologische aspecten van de voordrachten.

George de Haan:
“Mini x Maxi = Macht”

Stelling: “Het getij is aan het verlopen en als we niet snel de bakens verzetten, missen we de boot”.

Een gloeilamp lijkt een simpel gebruiksvoorwerp, maar het maken van lampen in grote aantallen is wel degelijk een precisietechnologische uitdaging van formaat, enerzijds door de precisie van de machines en anderzijds door de vereiste reproduceerbaarheid van het productieproces. Ter illustratie: Philips maakt per jaar 2,3 miljard gloeilampen wereldwijd; in de machines zijn op onderdeelniveau nauwkeurigheden van enkele micrometers vereist.
De handmatige fabricage van gloeilampen uit 1898 wordt al vrij snel vervangen door simpele mechanisatie van het handproces. Daarna ontstaan er geavanceerdere machines voor een continu lijnproces zonder tussenvoorraden. In de jaren zestig van de vorige eeuw worden er

Het gebouw van de LiS heden ten dage.

hoge snelheden bereikt op machines met terugkoppeling en met een ontwikkelcyclus van zo'n 15 jaar.

Bij TL-lampen is eveneens een dergelijke ontwikkeling te onderkennen, zij het dat die pas aan het eind van de jaren dertig begint. De eerste machines maken TL's met de "ballon" verticaal. Later ontstaan er geavanceerdere machines voor horizontale TL-productie. Miniaturisatie en elektronificatie worden kenmerkend voor de latere TL-generaties: afnemende diameter, lagere Hg-dosering en steeds compactere elektronica.

Autolampen zijn voorbeelden van dezelfde tendens, met als extra complicatie de vervanging van glas door kwarts. Samenvattend: het op grote schaal maken van een grote variëteit aan lampen wemelt van de precisietechnologische hoogstandjes.

Algemene trends zijn de afnemende ontwikkelcyclustijd, de toenemende complexiteit, de toenemende behoefte aan systeemoplossingen en elektronificatie, en de globalisering van het ontwikkelproces van producten en machines. Daarbij gaat het om hoge productiesnelheden met hoge productnauwkeurigheid en geringe spreiding van afwijkingen. Wie op de trends "Maxi" voor snelheid en "Mini" voor zowel precisie als miniaturisatie het antwoord heeft, bezit de "Macht". Wie dat antwoord niet weet te vinden, verliest de strijd en mist de boot.

Een belangrijk deel van dat antwoord bestaat uit geïntegreerde internationale samenwerking in kennis- en ervaringsketens van toeleveranciers en ontwikkelaars van producten en machines. De belangrijkste reden daarvoor is dat in andere landen en werelddelen de lonen lager zijn. Dus zullen we de kennis en ervaring die we in de loop van 110 jaar hebben opgebouwd in de omgeving van Eindhoven, moeten spreiden. Als we dat niet doen, worden we hier door de ontwikkeling van het kostenniveau ingehaald.

We zijn al meer dan een eeuw met succes actief in de verlichtingswereld. Door flexibele aanpassing aan gewijzigde omstandigheden zullen we dat naar mijn stellige overtuiging in de toekomst blijven doen.

Nico Grootenboer: "Gaat het om de muziek of om het publiek?"

BIHCA is een fijnmechanisch toeleveringsbedrijf, dat sinds de oprichting in 1984 gegroeid is van 15 naar 100 personeelsleden. Klanten zijn onder meer een belangrijke fabrikant van machines voor de IC-industrie en diverse Duitse bedrijven.

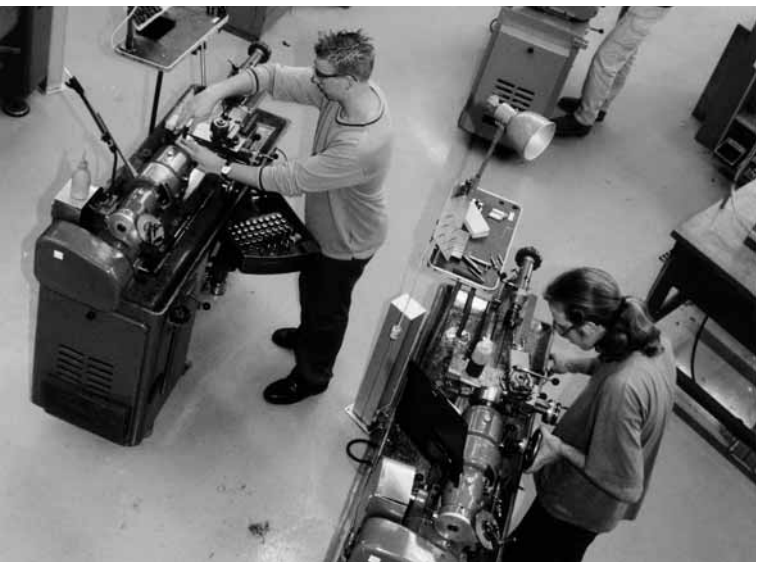
In dit enigszins allegorische verhaal bedoel ik met "muziek" de producten en met "publiek" de klanten.

Instrumentmakers in spe aan het begin van de vorige eeuw aan de draaibank.

Dus stel ik hier de vraag aan de orde of we ons als hobby bezig moeten houden met precisietechnologische hoogstandjes of dat we bereid zijn te luisteren naar de wensen van onze klanten. Met andere woorden: als je alleen muziek speelt die je zelf mooi vindt, moet je voor je optreden een te hoge prijs vragen waardoor je geen publiek meer trekt, of je moet genoegen nemen met droog brood als schamele verdienste.

Vroeger was een goede draaibank voldoende, tegenwoordig heeft een fijnmechanisch bedrijf een rij specialistische machines nodig, die ook nog snel verouderen. Helaas is het moeilijk daarvoor de goede mensen te vinden, want techniek is "uit" en management is "in". Ondertussen stelt de klant steeds hogere eisen, die raken aan het onmogelijke. Daarvoor is niet alleen technisch kunnen noodzakelijk, maar moet een bedrijf ook beschikken over een goede organisatie, gekenmerkt door flexibiliteit, leverbetrouwbaarheid, kosteninzicht en complete oplossingen voor complexe problemen. Kortweg, het publiek vraagt niet om één enkele muzikant maar om een volwaardig en goed ingespeeld orkest.

Maar zijn we, en in het bijzonder de opleidingen, klaar voor die andere eisen? Het bedienen van de machines is geen probleem, maar wel de samenwerking en organisatie er omheen. Er is behoefte aan andere specialisten als calculators, projectleiders, inkopers, enzovoort. Geen pure managers, maar mensen die ook het nodige weten van techniek. Laat daarom leerlingen in opleiding niet alleen fraaie werkstukken maken, maar leer ze ook de kostenaspecten door ze een taakstellend aantal uren op te geven.
Door de globalisering en verbeterde communicatie komt het buitenland steeds dichterbij. Dat hoeft geen bedreiging te zijn, maar biedt juist extra kansen. Kunnen we die concurrentie met het buitenland wel aan??? Ik plaats extra vraagtekens, omdat ik ook niet alles weet. Maar hopelijk komen er bij de forumdiscussie interessante antwoorden boven tafel.



Meer ruimte en licht bij draaibewerkingen anno 2001, maar wel met dezelfde geconcentreerde aandacht voor precisie.

Joost Frenken: "Hoe klein kun je gaan?"

In plaats van honderd jaar terug kijk ik liever naar de toekomst. En dan wil ik nu al de vraag in de titel van deze voordracht beantwoorden: we kunnen gaan tot de diameter van één atoom en dat is zo ongeveer 0,25 nanometer. Werken in het nanometergebied noemen we nanotechnologie. Dat lijkt een soort science fiction, maar ik zal u laten zien aan de hand van voorbeelden van onder andere IBM (die daar veel onderzoek en dus geld in steekt) en van ons eigen Kamerlingh Onnes-laboratorium, dat nanotechnologie geen pure fictie is maar harde werkelijkheid kan worden.

Eerst iets over de miniaturisering van elektronica. Daarvoor geldt een empirische wetmatigheid – de Wet van Moore – die zegt dat het aantal transistors op één cm^2 van een geïntegreerde schakeling iedere 1,5 jaar verdubbelt. De vraag is natuurlijk of dat verbluffende effect steeds maar door kan gaan. Op het ogenblik is de kleinste afmeting op een IC 100 nm en volgens de genoemde wetmatigheid zal die afmeting iedere drie jaar gehalveerd moeten worden. Dat kan misschien doorgaan tot we de afmeting van een atoom hebben bereikt, dus tot een kleinste detail in een chip van 0,25 nm. Het betekent in ieder geval dat er – fysisch gezien - in het jaar 2025 een eind moet komen aan de Wet van Moore!

Nanotechnologie houdt in dat we in staat zijn individuele atomen en moleculen te manipuleren: "Shaping the

De diverse componenten van een Philips TLD-buis.

world atom by atom". Dat dat geen nieuw idee is, bewijst een profetische lezing uit 1959 van de bekende fysicus en didacticus Feynman met de uitspraak: "There's plenty of room at the bottom". Als we in staat zijn atomen te manipuleren, ontstaat er een bijna onbeperkt aantal mogelijkheden en daarmee een geweldige hoeveelheid toepassingsgebieden.

Dat het niet gaat om hersenspinsels, wil ik u bewijzen door het tonen van resultaten van STM-onderzoek: Scanning Tunneling Microscopy. Daarbij tast in hoogvacuüm een soort pick-up-naald een schoon oppervlak af. Een piëzo-elektrisch vervormbaar element geeft dat microscopisch kleine naaldje een zodanige verticale beweging dat de afstand van 0,5 à 1 nm tussen naaldpunt en oppervlak constant blijft. Daarvoor wordt de stroom tussen naald en oppervlak, die het gevolg is van het zogenaamde tunneling effect, als stuursignaal gebruikt. Het resultaat is een hoogtelijnenpatroon dat op nanometerschaal inzicht geeft in de structuur van het oppervlak. Individuele atomen manifesteren zich daarbij als "bobbeltjes", zodat ze als het ware zichtbaar worden.

Het toekomstige manipuleren van atomen kan worden geïllustreerd aan ons onderzoek naar het gedrag van indiumatomen op een koperoppervlak. Bij 100 K is de beweging van de diffunderende In-atomen nog zo "traag" dat we de beweging duidelijk kunnen zien. STM-resultaten bij kamertemperatuur tonen In-atomen die zijn ingebed in het Cu-oppervlak. Heel verrassend is dat plaatjes die ieder 20 s zijn gemaakt, het "springen" van de In-atomen over 5 à 6 atoomafstanden in de Cu-roosterstructuur laten zien. Uit de statistiek van de bewegingen kunnen we afleiden dat de In-atomen hierbij gebruikmaken van vrije plaatsen in de structuur van het koperoppervlak. De beweging krijgt daarmee het karakter van een soort atomaire schuifpuzzel.

Als we de spelregels van dat soort atomair gedrag voldoende gaan begrijpen, wordt het wellicht ook mogelijk atomen te sturen. Daarvoor zou eveneens een STM kunnen worden toegepast. De STM-taster pakt dan een atoom op dat zich boven het oppervlak bevindt en verschuift het naar een nieuwe positie. Op deze manier wordt het mogelijk nieuwe structuren atoom voor atoom op te bouwen. Dat is pas echte nanotechnologie!

Fraaie plaatjes van IBM tonen LEGO-achtige nanotechnologie: het schrijven van het beeldmerk met atomen en de realisatie van een zogenaamde kwantum-kraal in de vorm van een ring van 48 Fe-atomen op een Cu-oppervlak. Maar de natuur heeft de nanotechnologie die wij nu moeizaam in onze vingers proberen te krijgen, allang uitgevonden. Dat toon ik u aan het voorbeeld van een enzym dat een DNA-molecuul "bewerkt". Met behulp van CAD-computerprogramma's zijn reeds diverse atomaire modelsystemen ontwikkeld: een moleculaire pomp, een nanomotor met twee in elkaar grijpende "tandwielen" en een combinatie van een biologisch rondsel met heugel.

Het voorgaande lijkt op futuristische hersenspinsels, maar ik durf te voorspellen dat als deze nanowetenschap gaat uitgroeien tot praktische nanotechnologie, ons een ware revolutie te wachten staat. Die revolutie zal te vergelijken zijn met de omwenteling in de elektronica door de uitvindingen van transistor en geïntegreerde schakeling. Ik hoop u duidelijk te hebben gemaakt dat wij voor een geweldige uitdaging staan. En daarvoor zullen technisch-wetenschappelijke "all-rounders" nodig zijn, die van veel fysische en technologische markten thuis zijn.

P.M. op den Brouw:
"Precisietechnologie geeft de maat aan"

Dit is niet een verhaal over precisietechnologische hoogstandjes maar over beleid: hoe kijkt het Ministerie van Economische Zaken – en in het bijzonder het sinds 1

Het 'stel' van de TLD-buis sterker vergroot. Links de aansluitdraden, rechts het glazen buisje met kwik. Dankzij deze zogenaamde kwikpil is de – minimale – kwikdosering nauwkeurig beheersbaar.

april bestaande Directoraat-generaal Innovatie – aan tegen het vakgebied precisietechnologie. In ieder geval beschouwen wij de precisietechnologische industrie als een sector met een groot innovatief vermogen. Dat laatste is te definiëren als het vermogen snel technologische vernieuwingen toe te passen in producten en processen.

Rothwell onderscheidt vijf fasen in de technologische ontwikkeling:

50-65: sterke economische groei met positieve beschouwing der techniek;
65-70: van technology push naar market pull;
70-85: toenemende technologische complexiteit, afnemende groei, negatieve beschouwing techniek;
85-95: strategische visie steeds belangrijker, terug naar kerncompetenties, kortere doorlooptijden;
heden: integratie en parallelliteit in netwerken, dynamische vraaggestuurde markten.

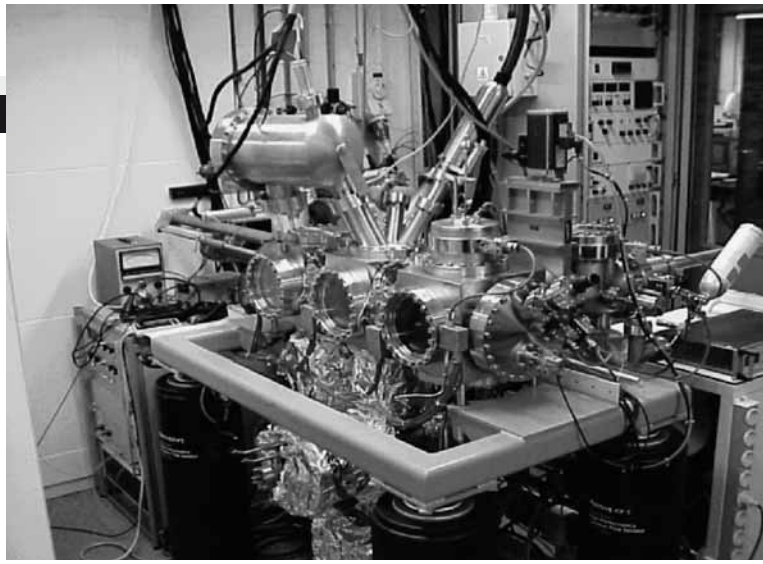
In de 21e eeuw is het innovatief vermogen bepalend voor de vraag of bedrijven de strijd op het economische slagveld winnen of verliezen!

In de technologie onderscheidt men: kerntechnologie (waarin een bedrijf zich onderscheidt en daarin uitblinkt), sleuteltechnologie (essentieel voor het fabricageproces) en "enabling technology" (nodig voor de creatie van nieuwe mogelijkheden). Voorbeelden van de laatste soort: ICT, elektronica, precisietechnologie.
Precisietechnologie treft men als enabling technology aan in heel veel industriële sectoren en is daarom vaak bepalend voor het innovatief vermogen van bedrijven. Maar precisietechnologie is door het multidisciplinaire karakter moeilijk onder te brengen in de huidige kennisinfrastructuur.
Wat is de rol van het Ministerie van EZ in de hiervoor geschetste problematiek? EZ kan door het stimuleren, genereren en overdragen van technologische kennis en het stimuleren van innovatief ondernemerschap bijdragen aan het versterken van het concurrerend vermogen van het Nederlandse bedrijfsleven. Kortweg: agenderen, realiseren, activeren, kennisdiffusie, stimuleren van samenwerking. Voorbeelden: IOP's, biopartnership, technostarters, TOK/TOP, BTS.
De lange lijst van industriële sectoren waarvoor precisietechnologie van essentieel belang is, begint bij wetenschappelijke en medische instrumenten en systemen, en eindigt bij consumentenproducten en telecommunicatieapparatuur, zoals de hyperkleine GSM, die in de huidige samenleving niet meer is weg te denken. En dat is voor een belangrijk deel te danken aan de toepassing van precisietechnologische hoogstandjes. Daarom eindig ik met de stelling waarmee dit betoog begon: precisietechnologie geeft de maat voor de toekomst aan.

Forumdiscussie

Het forum dat tot slot van het symposium vragen van de deelnemers beantwoordt, bestaat uit de sprekers, en verder uit Joris Gonggrijp en Hans Krikhaar. George de Haan is door dringende werkzaamheden elders niet meer aanwezig.

De allereerste vraag betreft de lezing van Joost Frenken. Hoe kunnen de atomen op de plaatjes van IBM vast op het oppervlak liggen, terwijl de plaatjes van Frenken laten zien dat atomen verspringen? Antwoord: dat is een kwestie van temperatuur, want de IBM-plaatjes zijn gemaakt bij 4,2 K, het kookpunt van helium. Maar hier geldt een soortgelijk verhaal als bij supergeleiding. Op het ogenblik is dit hoogstandje alleen mogelijk onder exotische omstandigheden. Als we erin zouden slagen die structuren ook op een minder omslachtige manier te



De STM-opstelling in het Kamerlingh Onnes Laboratorium

maken, en wel zo dat ze onder normale condities intact blijven, is er een geweldige doorbraak in de toepassing ervan te verwachten. Vandaar dat IBM zoveel investeert in dit soort fundamentele research. Nederlandse bedrijven doen dat vandaag de dag eigenlijk niet genoeg, en verwachten op fundamenteel gebied (te?) veel van de universiteiten.

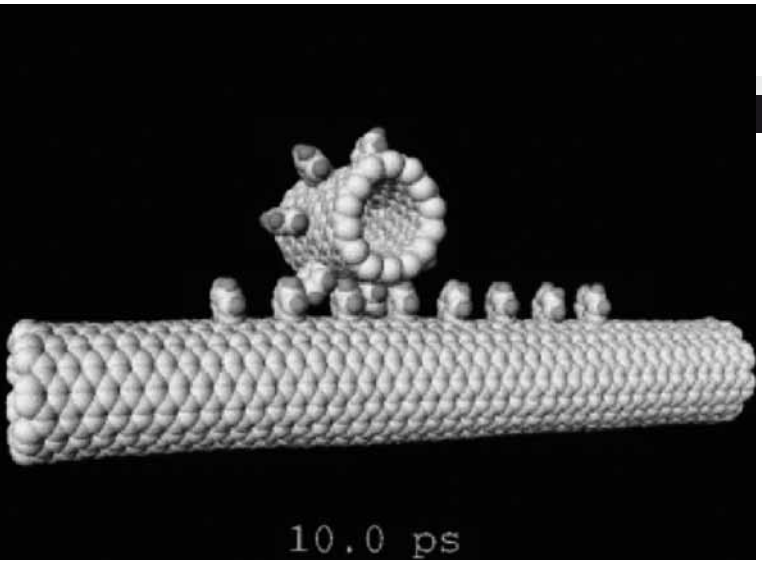
De volgende opmerking trekt een parallel met de Industriële Revolutie in Engeland. Daar miste men in de twee vorige eeuwen de boot van de industriële vernieuwing. Frenken antwoordt dat dat in overeenstemming is met de zogenaamde wet van de remmende voorsprong. Zelfvoldaan uitdrijven op bestaande kennis en ervaring zou kunnen betekenen dat wij ook hier de innovatieslag verliezen in vergelijking met Duitsland, Japan en de Verenigde Staten, waar meer fundamenteel onderzoek plaatsvindt op het gebied van nanotechnologie.

Een van de aanwezigen merkt op dat we ons misschien moeten concentreren op dat waar we goed in zijn: handelen en transporteren. Grootenboer zegt dat we Europees moeten denken en niet bekrompen nationaal. We moeten keuzes maken en bijvoorbeeld geen complete vliegtuigen willen maken en ontwikkelen, maar liever deelnemen in consortia zoals Airbus. Want deelsystemen ontwikkelen en maken kan ook een grote uitdaging zijn. Gonggrijp merkt – uit eigen ervaring - op dat Fokker in 1985 de kans heeft gehad deel te nemen aan de samenwerking in Airbus, maar die kans toen niet heeft willen grijpen.

Frenken vraagt zich af wat de overheid aan nanotechnologie doet of gaat doen. Op den Brouw zegt dat belangrijke doorbraken vaak door de overheid worden opgepakt. Aansluitend op de opmerkingen van Frenken over supergeleiding: er is door de overheid bijvoorbeeld een programma van 10 miljoen gulden opgezet voor onderzoek naar hoge-temperatuur-supergeleiders. Op het gebied van supergeleiding iets boven het absolute nulpunt waren we weliswaar in het begin niet actief, maar toen in Zwitserland supergeleiding bij hogere temperatuur werd ontdekt, sprongen we er snel in. Een ander voorbeeld ligt op het terrein van de genomics. Dat is ook zo'n doorbraakgebied, waarop vanuit het veld een actieplan van 500 miljoen gulden aan de overheid is voorgelegd. Over die voorstellen buigt zich momenteel de Commissie Wijffels, met het doel een advies aan de overheid uit te brengen. Overigens wordt er in het actieplan en de tussenacties van de commissie zijdelings gerefereerd aan nanotechnologie. Hier ligt ook een uitdaging in de richting van de nanofysica van Joost Frenken.

Dan wordt de vraag opgeworpen hoe het zit met de multiculturele samenwerking bij het stimuleren van de instroom van vakmensen in de precisietechnologie. Gonggrijp antwoordt dat er bijvoorbeeld vier Indonesische studenten een opleiding volgen aan de LiS. Die hebben zich met een opmerkelijke felheid op hun opleiding in glas- en lasertechniek gestort. Misschien komt er nog wel eens een LiS-achtige opleiding in Indonesië. Maar voor dat soort internationale samenwerking is ook de hulp van het bedrijfsleven nodig. Krikhaar constateert dat die samenwerking steeds meer op gang komt en Frenken zegt dat 50% van zijn medewerkers uit het buitenland komt.

Uit het gehoor wordt de vraag gesteld of er een verklaring is voor de geringe instroom bij de opleidingen voor vakmensen. Gonggrijp vindt het erg belangrijk dat bedrijven zich "aan de voordeur" van de opleiding manifesteren. De LiS heeft 50 à 60 aanmeldingen per jaar, maar dat zouden er veel meer kunnen zijn. Er zijn voor al die LiS-afgestudeerden ook banen! Volgens Krikhaar moet er meer aan precisietechnologie-PR worden gedaan. Grootenboer zegt dat de industrie nu een "broodje van eigen deeg" krijgt. In de jaren 70 tot 90 zijn de textielindustrie, de scheepsbouw en andere industrietakken grotendeels uit Nederland verdwenen. Daardoor is het beeld van de techniek nog steeds ongunstig en daar plukken we nu de wrange vruchten van. Bovendien is de



Nanotechnologie in de computer: een moleculaire tandheugel met rondsel. Nu nog fictie, straks werkelijkheid?

betaling van vakmensen onder de maat. Een werkvoorbereider bijvoorbeeld, wordt beter betaald dan een man achter de bank.
Vanuit de zaal komt de opmerking dat ouders met een technisch beroep zelden hun kinderen naar een technische opleiding sturen. Iemand anders zegt dat er van overheidswege voor bijvoorbeeld opleidingen Engels meer geld beschikbaar is dan voor technische opleidingen. Op den Brouw stelt dat het overheidsbeleid meestal een afspiegeling is van dat wat zich in de samenleving afspeelt. De overheid kan niet tegen de stroom in roeien. Er wordt opgemerkt dat de afbraak van ambachtelijke opleidingen is begonnen met de invoering van de Mammoetwet, want toen werd er gekozen voor algemene schoolopleidingen in plaats van specialisaties.
Grootenboer zegt dat er sprake is van een slingerbeweging: de wal zal uiteindelijk het schip keren. Een grotere vraag naar vakmensen moet tenslotte een grotere opleidingspotentie opwekken. Vanuit het publiek: "Voor kinderen kun je tegenwoordig geen meccanodoos meer kopen!" Iemand anders merkt op dat bedrijven te gesloten zijn. Men krijgt interesse in techniek door er kennis mee te maken. Frenken stelt dat we maatschappelijk zijn doorgeschoten. Van de technische handvaardigheden zijn we overgeschakeld naar de "zachte" communicatieve vaardigheden. Daarom is er ook minder interesse voor een vak als fysica, maar wel voor bijvoorbeeld economie en management, in het algemeen voor vaardigheden die sneller verdiensten opleveren. Techniek heeft te lijden van negatieve beeldvorming; men vindt techniek een "vies" vak.
Daarna ontstaat er een levendige discussie over de oorzaken van het gebrek aan interesse van de jeugd voor techniek en de afbraak van de ambachtelijke vakopleidingen. Overheid en bedrijfsleven hebben daar beide schuld aan, dus heeft het weinig zin elkaar de zwarte piet toe te schuiven. Op den Brouw zegt dat de kloof tussen vraag naar vakmensen en de beschikbaarheid van goede opleidingen nu duidelijk onderkend wordt, maar dat maatregelen pas over 5 à 10 jaar resultaat opleveren. Het bedrijfsleven zou meer moeten meedenken met de overheid. Pas als er een wederzijdse consensus is bereikt, kan een overheidsorgaan als het Ministerie van Economische Zaken een actief beleid gaan voeren. Krikhaar zegt dat wij bij onze contacten met de overheid bij voortduring te berde moeten brengen dat EZ de precisietechnologie als een enabling technology beschouwt.
Hans Krikhaar acht dit een goed moment om het symposium te besluiten. "We weten nu waar we moeten aankloppen. Als we geld nodig hebben van de overheid, zijn we bij Op den Brouw aan het goede adres. Voor onze toekomstige behoefte aan prima vakmensen moeten we bij Joris Gonggrijp zijn. De kleinste afmetingen - tot de diameter van een atoom toe - behoren tot het interessante terrein van Joost Frenken. En als we behoefte hebben aan betrouwbare en kwalitatief hoogwaardige toeleveringen, weten we Nico Grootenboer te vinden."

Tot slot een noot van de verslaggever. Als er dan nog hoogwaardig licht nodig is om schijnbaar onoplosbare precisietechnologische problemen helder te belichten, kloppen we aan bij George de Haan.

Informatie:

Ir. G. de Haan, 040-2758223; **george.de.haan@philips.com**
N. Grootenboer, 0543-551212; **nico.grootenboer@bihca.nl**
Prof.dr. J.W.M. Frenken, 071-5275603; **frenken@phys.leidenuniv.nl**
Dr. P.M. op den Brouw, 070-3796087; **o.l.h.knap@minez.nl**
Dr. ir. J.W.M. Krikhaar, 040-2683388/2326111; **hans.krikhaar@asml.nl**
Ir. J. Gonggrijp, 071-5681168; **gonggrijp@lis-mbo.nl**

Noot

[1] Arbeidsmarkt en opleiding in de Precisietechnologie, NVPT-jaarboek 2000, blz. 135-139.

Grondslagen nader

Ongeveer 300 jaar geleden lanceerde Robert Hooke zijn beroemde "Wet van Hooke" en hij zal zich waarschijnlijk niet gerealiseerd hebben welke impact zijn wet zou hebben. We zullen hier niet verder op ingaan daar dit algemeen bekend is, we volstaan met het vermelden van de wet:

$$\Delta l = \frac{P \cdot l}{E \cdot F}$$

met Δl ***is de verlenging van een trekstaaf in mm.***

L is de lengte van de staaf in mm.

P is de trekkracht op de staaf in N

E is de elasticiteitsmodulus in $\frac{N}{mm2}$

F is de doorsnede van de staaf in mm^2

• *Flip Doorschot* •

Echter, al snel ging men zich afvragen of de staaf ook dunner zou worden tijdens de trekproef en dit leidde tot de zogenaamde constante van Poisson. In het elastische gebied blijkt dat voor veel technische materialen deze constante ν=0.3, en dat betekent dat de staaf inderdaad dunner wordt.
Nu ligt de vraag voor de hand of het volume van de staaf constant blijft. Uit de proeven komt naar voren dat in het elastisch gebied dit niet waar is. Er treedt een kleine volumeverandering op, die bij trek positief en bij druk negatief is. In het plastische gebied is het volume wel constant en dat betekent dat in dit gebied $\nu=\frac{1}{2}$, een belangrijke eigenschap die helaas nogal eens wordt vergeten.
Afschuifproeven en torsieproeven brengen een andere grootheid in beeld namelijk de glijdingsmodulus G. Dit blijkt geen onafhankelijke grootheid te zijn, er geldt de betrekking:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

De E de G en de ν worden verondersteld constanten te zijn. Verdere studie laat zien dat men nog meer zogenaamde "materiaalconstanten" kan vinden, maar er blijken er telkens maar twee onafhankelijk te zijn. Dus men kan er twee vrij kiezen, de andere zijn hiervan afhankelijk. Vaak kiest men de E en de ν, maar dat is niet noodzakelijk.
Dit alles kan men in de bestaande literatuur nalezen.

Paniek

Bij de ontwikkeling van een nauwkeurig relais (het reedrelais) proberen we heel nauwkeurige bladveren te maken. Bij de berekening maken we gebruik van de E-modulus zoals door de fabrikant van het materiaal opgegeven. Bij meting van de veerconstante van de bladveer

bekeken

klopt er geen fluit van. We vragen de fabrikant naar zijn mening, maar deze geeft aan dat er recht toe recht aan gemeten is. Daarop besluiten we om de E-modulus dan maar zelf in ons eigen laboratorium te gaan meten, maar we vinden dezelfde waarde als de fabrikant. Uiteraard wordt de berekening tig maal gecontroleerd, maar daar ontdekken we geen fout in. Bij de bespreking van de metingen wordt de mogelijkheid geopperd om de E-modulus te meten met een trillingsproef, logitudinaal, transversaal of via torsie. Aangezien we toch niet kunnen kiezen, besluiten we om ze maar alle drie te nemen. We vinden drie verschillende E-moduli, en samen met die uit de trekproef hebben we er nu vier. Deze liggen, schrik niet, 30% uit elkaar. De E-modulus die het gedrag van het reedrelais zou kunnen verklaren ligt daar ergens tussenin. We hebben er dus vijf, wil de ware E-modulus opstaan? Natuurlijk hebben we gecorrigeerd voor de eindige afmetingen van de trilstaafjes, maar dat levert maar enkele procenten op, geen dertig! Nu worden we echt vals en we besluiten om de E-modulus te meten aan **één** staafje. Eerst de drie trillingsmetingen die niet-destructief zijn en daarna met de trekproef. We vinden precies dezelfde spreiding.

Er is toen een productie opgezet waarin de fout in E automatisch gecorrigeerd kon worden, ik kan daar helaas niet verder op ingaan.

Hetzelfde fenomeen trof ik ook aan bij het werken met maraging-staal en een echte verklaring is nog niet (door mij) gevonden.

Op zoek naar een verklaring heb ik uiteraard contact gezocht met de collega's van mechanica, het resultaat is ronduit bedroevend. Ze hebben én geen verklaring, én geen belangstelling. "We postuleren gewoon dat E constant moet zijn" is hun reactie, maar helaas kent de natuur hun postulaat niet zoals blijkt.

Alleen al op grond hiervan kan men grote vraagtekens zetten bij de berekeningen die men met de "Eindige elementen"-programma's maakt. We komen hierop nog terug.

Poging tot verklaring

Stel we hebben een brok elastisch materiaal. We hebben gezien dat we het gedrag van een elastisch verschijnsel dan met twee onafhankelijke elastische constanten kunnen beschrijven. Stel nu dat we een tweede brok elastisch materiaal hebben. Daarvoor geldt dan uiteraard hetzelfde. Het is echter niet per se nodig dat dit dan dezelfde constanten zijn. Deze zouden per brok en per elastisch verschijnsel kunnen verschillen en daar wijzen de waarnemingen die ik vermeldde op. Graag geef ik deze verklaring op voor een betere, want echt bevredigend is dit alles niet.

Voor de meeste technisch toegepaste materialen blijkt dat ze zich niet zo misdragen als geschetst, maar helaas geldt het niet voor allemaal, dus u bent gewaarschuwd!

Kristallieten

Uit de metaalkunde weten we dat de metalen opgebouwd zijn uit kristallieten, die een eindige afmeting hebben. Bij navraag blijkt dat de meerderheid er geen idee van heeft hoe groot deze dingen zijn. De gemiddelde afmeting van een kristalliet van een commercieel verkrijgbaar materiaal is in de orde van 20 µm. Via warmtebehandelingen en dergelijke kan men wel kleinere krijgen, maar meestal gaat dit ten koste van de bewerkbaarheid dus dat wil men liever niet.

Nemen we nu een stuk plaatmateriaal van 0.1 mm dik (dus 100 µm) dan liggen er nog maar 5 kristallieten gemiddeld op elkaar en dat is niet veel. Dit betekent dat we zeker niet meer mogen spreken over een isotroop en homogeen medium. Toch wordt er maar mondjesmaat aandacht besteed aan dit probleem.

We zullen nu een principeberekening uitvoeren die ons gevoel geeft voor wat het eindig zijn van de kristallieten betekent voor de materiaaleigenschappen.

We nemen een strip met lengte l waar we aan trekken met de kracht P.

Aannamen:

1. Kristallen liggen ofwel met de oriëntatie 100 (ribben) ofwel met de oriëntatie 111(diagonaal) evenwijdig aan de lengterichting van de strip.
   Andere oriëntaties worden niet in beschouwing genomen.
2. E-modulus in de diagonaalrichting van het kristal = E_{11}
   E-modulus in de ribbenrichting van het kristal = E_{22}
   $E_{11}>E_{22}$

3 De in 1 beschreven oriëntaties komen met gelijke kans = $\frac{1}{2}$ voor, onafhankelijk van de oriëntaties van de omliggende kristallieten.
4 Alle kristallieten hebben een kubusvorm met dezelfde afmetingen δ×δ×δ
De totale strip bestaat uit N kristallieten met
M kristallieten in de breedterichting
K kristallieten in de hoogterichting en
L kristallieten in de lengterichting.
L•δ=l (NB: hier staat de letter l, niet het cijfer 1)
5 De kristalgrenzen brengen geen schuifspanning over. Deze aanname zal een veilige schatting geven van de spreiding in de gemeten E-modulus van de strip.

Orientatie verdeling

De kans dat in de strip met N kristallen, k kristallen met de diagonaal evenwijdig met de lengterichting van de strip georiënteerd zijn en m kristallieten met de ribben evenwijdig aan de lengterichting van de strip georiënteerd zijn, is gegeven door de binomiale verdeling.

$$P(k,m) = \frac{N!}{k! \bullet m!} \bullet \left(\frac{1}{2}\right)^k \bullet \left(\frac{1}{2}\right)^m$$

Hieruit kunnen we afleiden:
Voor de gemiddelden μ:

$$\mu_k = \frac{N}{2} \quad \text{en} \quad \mu_m = \frac{N}{2}$$

En voor de variaties:

$$\sigma_k^{\,2} = \frac{N}{4} \quad \text{en} \quad \sigma_m^{\,2} = \frac{N}{4}$$

We nemen nu een strip met **een** kristalliet in de doorsnede dus: M=K=1 en L=N
Indien we nu consequent de wet van Hooke toepassen op zowel de hele strip als op georiënteerde kristallieten en tevens gebruikmaken van de bovenstaande gemiddelden en spreidingen, kunnen we het volgende vinden voor de flexibiliteit F=: $\frac{1}{E}$
Voor het gemiddelde

$$\mu_F = \frac{1}{2} \bullet \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}}\right)$$

en voor de spreiding

$$\sigma_F = \frac{1}{2 \bullet \sqrt{N}} \bullet \left(\frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{E_{11}}\right)$$

Brengen we in de doorsnede niet **een** kristalliet, maar **MxK**, dan vinden we:
voor het gemiddelde $\mu_F = \frac{1}{2} \bullet \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}}\right)$

en voor de spreiding $\sigma_F = \frac{1}{2 \bullet \sqrt{N}} \bullet \left(\frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{E_{11}}\right)$

met N=LxKxM

Aangezien F=: $\frac{1}{E}$ kunnen we hieruit afleiden:

$$\frac{E_{max}}{E_{min}} = \frac{\mu_F + 3 \bullet \sigma_F}{\mu_F - 3 \bullet \sigma_F} \qquad \text{(99.9\% zekerheid)}$$

Vul deze grootheden in, noem E_{11}=a.E_{22}, en we willen

$$\frac{E_{max}}{E_{min}} = p$$

We vinden dan:

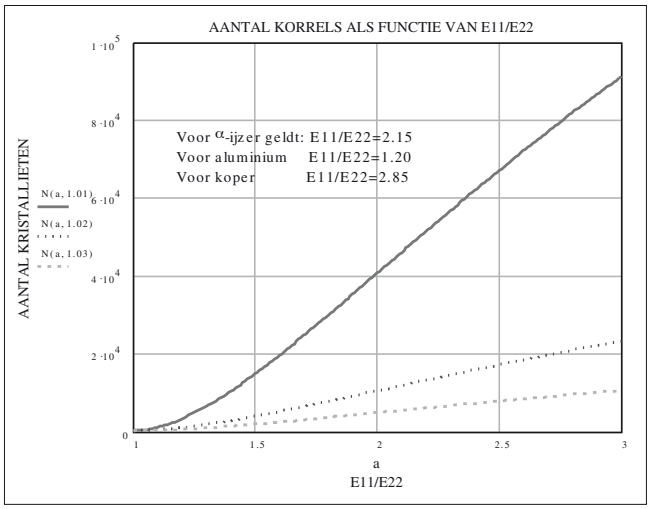
$$\frac{\frac{1}{2} \bullet \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}}\right) + \frac{3}{2 \bullet \sqrt{N}} \bullet \left(\frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{E_{11}}\right)}{\frac{1}{2} \bullet \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}}\right) - \frac{3}{2 \bullet \sqrt{N}} \bullet \left(\frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{E_{11}}\right)} = p$$

Hetgeen leidt tot:

$$N(a,p) := 9 \bullet \frac{(a - 1 + p \bullet a - p)^2}{(-1 - a + p + p \bullet a)^2}$$

N(a,1.01) betekent dat de spreiding in de E-modulus 1% is.

Uiteraard kan men op deze berekening heel wat afdingen, het is ook best mogelijk om hem uit te breiden maar dan ontstaan formules die veel ingewikkelder zijn en nauwelijks meer inzicht geven. Daarom laten we het hierbij. Wel is het nodig om nog even naar de gevonden resul-



taten te kijken. De formule kan namelijk niet voor alle N's gelden. Als N klein wordt, kan de gemeten E- modules groter worden dan E_{11} of kleiner dan E_{22}. Dat kan natuurlijk niet. Werken we dit uit dan vinden we:

Bij $E_{min}=E_{22}$ $$N_1 = 9 \bullet \frac{(a-1)^2}{a^2}$$

En bij $E_{max}=E_{11}$ $$N_2 = 9 \bullet (a-1)^2$$

$N_2>N_1$ Voor a=3 geldt $N_2=36$.

Dus een veilig getal is minstens 36 kristallieten in het materiaal.
Keren we nu terug naar de grafiek. Stel we hebben een materiaal waarvoor geldt dat a=2. We willen een materiaal met een E-modulus die niet meer dan 2% spreiding vertoont. Uit de grafiek lezen we dan af dat $N=10^4$ kristallieten (middelste stippellijn).
Stel de kristallieten zijn gemiddeld 20 µm groot.
De kubus met 10^4 kristallieten is dan groot

$$0.02 \bullet \sqrt[3]{10000} = 0.43mm$$

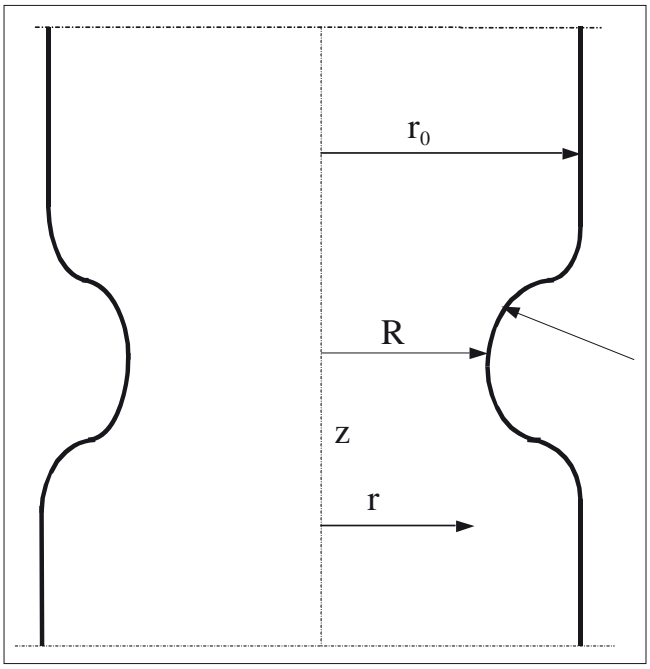
Nemen we een strip van 0.1mm dik en 0.5mm breed, dan zitten in de doorsnede $\frac{0.1 \bullet 0.5}{0.02 \bullet 0.02}$=125 kristallieten. Voor de lengte zijn er dan nog over 10000/125=80, dus het plaatje is dan 80 × 0,02 = 1,6 mm lang.

We zien dat dit toch reeds afmetingen zijn die in de miniaturisatie normaal worden toegepast.

Nogmaals merk ik op dat er heel veel op de berekening valt af te dingen, maar ingewikkelder berekeningen laten eenzelfde orde van grootte zien. Dus we laten het hierbij. Wel kijken we nog even naar de grootte van een kristalliet. Hoe weten we die eigenlijk? Stel, we pakken een zak knikkers die allen even groot zijn, en die goed zijn opgesloten. We schieten een kogel door de zak zodat er een mooi rond gat ontstaat, de knikkers worden op willekeurige hoogten doorsneden. Kijken we in dat gat dan zien we rondjes, met allemaal een verschillende diameter.
Vullen we de zak nu met knikkers met verschillende diameters en schieten we weer een mooi rond gat dan zal ongeveer hetzelfde beeld ontstaan, rondjes met allemaal een verschillende diameter.
Het zal niet meevallen, als we alleen de beelden in het gat kennen, om daaruit af te leiden of de zak knikkers met dezelfde diameter heeft, of dat ze allen verschillend zijn. Maar dat is wel precies het probleem als we via de doorsnede van een preparaat de kristallietgrootte bepalen!

De trekproef

In figuur 1 is schematisch een ingesnoerde trekstaaf weergegeven. In de inleiding hebben we een paar wetens-



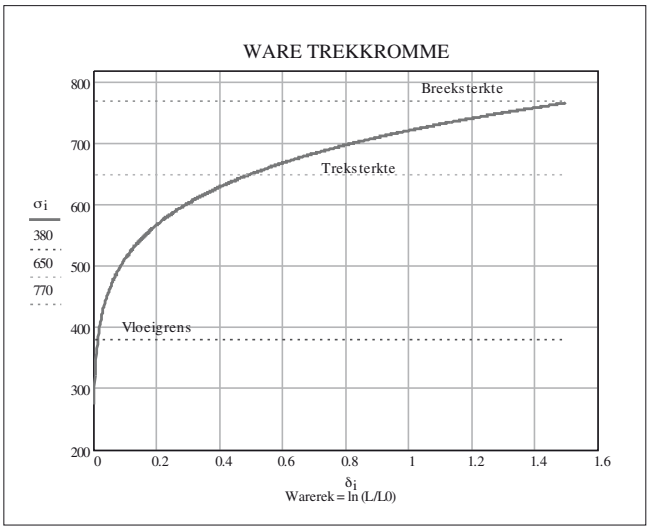
Figuur 1

waardigheden van de trekproef aangehaald, en we hebben in het vervolg gezien dat het allemaal toch niet zo triviaal is als men ons wil doen geloven. Over de trekproef is enorm veel gepubliceerd en je kan je afvragen of er nog wel nieuwe feiten gevonden kunnen worden. We zullen zien.
Meestal weet men het meest over het elastische gebied, daar zullen we dan ook niet te lang bij blijven stilstaan.
Iets wat wel merkwaardig is, is het feit dat men trekproeven doet aan genormaliseerde trekstaven. Dat is vreemd, omdat men uit deze proeven materiaalconstanten wil afleiden. Maar het is niet waarschijnlijk dat materiaalconstanten zich iets zullen aantrekken van een normalisatie, dat is niet voor de hand liggend!
Een probleem waarmee men geconfronteerd wordt is dat het vaak helemaal niet mogelijk is om een genormaliseerde trekstaaf te maken. Men doet dan proeven aan plaatmateriaal of aan heel dunne draad (in de volksmond apehaar genoemd). Hoe de materiaalgrootheden, aldus bepaald, samenhangen met de gegevens uit de genormaliseerde trekproeven, is vaak een bron van misverstanden. Met name Nadaï, Veenstra en Kals hebben veel en goed werk verzet om hier duidelijkheid over te geven. Echter, veel is nog onduidelijk. Wat we nodig hebben zijn omrekenfactoren waarmee we de gemeten grootheden aan dunne draad, plaatmateriaal en genormaliseerde trekstaven met elkaar kunnen vergelijken.
Er zijn dan twee mogelijkheden: óf deze grootheden bestaan en dus passen we ze toe, óf ze bestaan niet en dan hebben we vele jaren voor nop genormaliseerde trekstaven gemaakt. In de toekomst zullen we proberen of hier meer zicht op te krijgen is.

In de navolgende grafiek hebben we nogmaals de trekrekkromme weergegeven, in dit geval de ware. Dus de spanningen zijn gevonden door de kracht te delen door de momentane doorsnede en voor de rek is gebruikgemaakt van de ware rek die is gedefinieerd als

$$\delta = \ln \frac{L}{L_0}.$$

Hierbij maak ik gebruik van de symbolen zoals gebruikt door prof. Veenstra in zijn collegedictaat (Technische Plasticiteitsleer collegeno.4743).
Zonder hier verder op in te gaan, vermeld ik nog een aantal resultaten zoals die worden toegepast in de plasti-



citeitsmechanica. Hiervoor wordt u verwezen naar bestaande literatuur op dit gebied.

In het plastisch gebied gebruikt men de relatie $\sigma = C \cdot \delta^n$ als er geen voorversteviging is opgetreden en van $\sigma = C \cdot (\delta_0 + \delta)^n$ als er wel voorversteviging is opgetreden. Deze relatie wordt toegeschreven aan Nadaï.

Het is een probleem om de vloeispanning goed te meten. Daarom kan men beter uitgaan van de modelvloeispanning die gegeven is door:

$$\sigma_v = \left(\frac{C}{E^n}\right)^{\frac{1}{1-n}}$$

Bij de treksterkte geldt $\delta = \mathbf{n}$ $0<n<0.6$

Voor de treksterkte kan men vinden:

$$\sigma_B = C \cdot \left(\frac{n}{e}\right)^n \qquad e=2.718$$

De laatste formules gelden als $\delta_0=0$.

Dit en nog veel meer kan men vinden in het bovenbedoelde dictaat, maar ook op nog veel meer plaatsen, bijvoorbeeld in dictaten van prof. Kals. Deze formules gelden allemaal als het materiaal vloeit.
De conditie waaronder het materiaal vloeit, is gegeven door de beroemde vloeivoorwaarde van Von Mises. Hier

wordt hij gegeven in cilindercoördinaten:

$$(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + 6 \bullet t_{r,\theta}^2 + 6 \bullet t_{\theta,z}^2 + 6 \bullet t_{r,z}^2 = 6 \bullet k^2$$

We komen nu terug op de eindige elementenmethoden (EEM). De meest ultieme test voor de juistheid van een programma is de volgende:
We programmeren in een programma dat plasticiteit aankan een proefstaaf met de elementenverdeling erbij. We geven het materiaal het materiaalgedrag dat we gemeten hebben in een trekproef en vragen aan het systeem om de trek-rek-kromme uit te rekenen. Dat is natuurlijk gemeen, want we weten al wat eruit moet komen, namelijk dezelfde kromme die we erin gestopt hebben. Maar helaas komt dat er niet uit. Het programma komt namelijk niet op het idee dat er insnoering moet optreden. Natuurlijk kunnen we dat wel bereiken door van buitenaf in te grijpen, maar dat heeft dan niks meer met fysisch gedrag te maken. Vele berekeningen hebben laten zien dat men er wel dichtbij kan komen, maar een één op één correspondentie heb ik helaas nog niet gezien. Maar even helaas is het zo, dat het punt van insnoering het einde van het betrouwbare bewerkingsgebied bepaalt, en als we dat niet goed voorspellen hebben we aan de hele berekening niets meer, of in ieder geval heel weinig. Persoonlijk heb ik er productietechnisch nooit iets mee kunnen doen. Het dichtst bij is gekomen dr. Hans van Wijngaarden die samen met Hans Galenkamp een vernuftig experiment heeft opgezet. Het proefschrift van Van Wijngaarden is het lezen nog steeds meer dan waard!

Insnoeren en Bridgman

Bij de trekproef nemen we waar dat het materiaal insnoert en in dit insnoeringsgebied treedt de grootste rek op. Bridgman heeft hier in het verleden uitgebreid onderzoek naar gedaan, zowel praktisch als theoretisch. Zijn berekeningen verdienen groot respect en hebben in ieder geval het meetgebied enorm uitgebreid.
Deze berekeningen zijn door Veenstra/Kals intensief gecontroleerd en zijn in de bestaande literatuur eenvoudig terug te vinden. We volstaan met het geven van de resultaten (zie voorgaande figuur 1).
Voor de spanningstoestand in de kleinste doorsnede vindt Bridgman:

$$\sigma_r = \sigma_\theta = k\sqrt{3} \bullet \ln \frac{R^2 + 2 \bullet R \bullet \rho - r^2}{2 \bullet R \bullet \rho}$$

$$\sigma_z = k \bullet \sqrt{3} \bullet (1 + \ln \frac{R^2 + 2 \bullet R \bullet \rho - r^2}{2 \bullet R \bullet \rho})$$

Door σ_z te integreren over het oppervlak kan men de trekkracht P vinden:

$$P = \pi \bullet k\sqrt{3} \bullet R^2 \bullet \left(1 + \frac{2 \bullet \rho}{R}\right) \bullet \ln\left(1 + \frac{R}{2 \bullet \rho}\right)$$

Noem nu $\dfrac{P}{\pi \bullet R^2} = \sigma_{zgem}$

Noem $k \bullet \sqrt{3} = C_B \bullet \sigma_{zgem}$ en we vinden de beroemde correctiefactor van Bridgman:

$$C_B = \frac{1}{\left(1 + \frac{2 \bullet \rho}{R}\right) \bullet \ln\left(1 + \frac{R}{2 \bullet \rho}\right)}$$

Uit de volume-invariantie kunnen we tot slot nog vinden

$$\bar{\delta} = 2 \bullet \ln \frac{r_0}{R}$$

voor de effectieve deformatie in de kleinste doorsnede:
We gaan nu iets anders doen. In feite ligt het meer voor de hand om bij zo'n trekstaaf cilindercoördinaten te kiezen (r,θ,z).
Van de spanningen weten we in de kleinste doorsnede al heel veel.
De spanningen hangen niet af van θ (rotatorisch symmetrisch).
$\theta_r = \theta_\theta$ $\tau_{r,\theta} = \tau_{z,\theta} = 0$ alleen $\tau_{r,z}$ blijft van de schuifspanningen over. We noemen hem verder τ. $\tau = \tau(r,z)$
$\tau(00) = 0$ $\tau(R,0) = 0$ $\sigma_r(R,0) = 0$

We gaan naar de evenwichtsvergelijkingen kijken:
Samen met $\sigma_r = \sigma_\theta$ gaan de evenwichtsvergelijkingen over in:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau}{\partial z} = 0 \qquad (1) \qquad \text{en}$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\tau}{r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \qquad (2)$$

De voorwaarde van Von Mises wordt in dat geval:

$$(\sigma_z - \sigma_r) = (3\mathbf{k}^2 - 3\tau^2)^{\frac{1}{2}}$$

in de kleinste doorsnede is τ=0 en dus

$$\sigma_z - \sigma_r = k\sqrt{3} \qquad (3)$$

Differentieer nu (1) naar z en (2) naar r en trek de twee uitkomsten van elkaar af. Substitueer hierin (3) en we vinden:

$$-\frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\tau}{r}\right) = 0$$

Substitueer nu **τ=f(r).g(z)**
Er ontstaan dan twee gewone differentiaalvergelijkingen die beide oplosbaar zijn. We vinden:

$$g'' + a^2 g = 0 \qquad \text{en}$$

$$r^2 f'' + r f' - \left(1 - a^2 r^2\right) f = 0 \qquad \text{Besselvergelijking}$$

a is de constante die door de separatie is ingevoerd. Deze mag geen functie zijn van r en van z, wel van bijvoorbeeld R of r_0 of iets dergelijks.

Werken we deze vergelijkingen uit en houden we rekening met de randvoorwaarden, dan vinden we ten slotte voor **τ**:
$\tau(r,z) = C \bullet sin(az) \bullet J1(ar)$

J1 is de Besselfunctie van de eerste soort en van de orde 1. Uiteraard zijn er twee oplossingen van de differentiaalvergelijking, echter de tweede valt weg omdat hij voor r=0 oneindig wordt.
Door deze **τ** te substitueren in (1) en (2) vinden we σ_r en σ_z. Dit is nu rekenwerk geworden en samen met de randvoorwaarden levert dit ten slotte:

$$C = \frac{k\sqrt{3}}{J0(aR)}$$

$$\tau = \frac{k\sqrt{3}}{J0(a \bullet R)} \bullet \sin(a \bullet z) \bullet J1(a \bullet r)$$

$\sigma_r = \sigma_\theta$

$$\sigma_z = \frac{k\sqrt{3}}{J0(a \bullet R)} \bullet \cos(a \bullet z) \bullet J0(a \bullet r)$$

$$\sigma_r = \frac{k\sqrt{3}}{J0(a \bullet R)} \bullet \cos(a \bullet z) \bullet J0(a \bullet r) - k\sqrt{3}$$

Door σ_z te integreren over de kleinste doorsnede vinden we de trekkracht P:

$$P = 2\pi \frac{k\sqrt{3}}{J0(a \bullet R)} \bullet \frac{R}{a} \bullet J1(a \bullet R)$$

Noem nu $a \bullet R = b$ Hierin is **b** een zuiver getal,

En noem in de formules van Bridgman $\frac{R}{2 \bullet \rho} = \alpha$

Gelijkstelling van de aldus behandelde formules van Bridgman voor P en σ_z met de formules voor P en σ_z zojuist gevonden, levert twee vergelijkingen met twee onbekenden op, namelijk:

$$\frac{1}{J0(b)} = 1 + \ln(\alpha + 1) \qquad (4)$$

Uit gelijkstelling σ_z met r=0 en

$$\frac{2}{b} \bullet \frac{J1(b)}{J0(b)} = \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \bullet \ln(1 + \alpha) \qquad (5)$$

Uit gelijkstelling van P

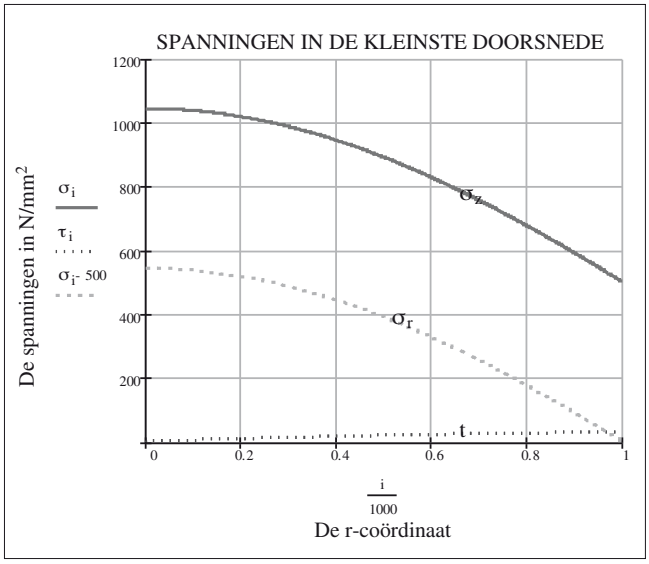
Los uit (4) de α op en substitueer die in (5). Men vindt dan een vergelijking waarin alleen nog de b voorkomt. Deze kan men niet expliciet oplossen maar moet men numeriek benaderen.
De formule ziet er als volgt uit (zie volgende bladzijde, de bovenste formule):
Ik kan het ook niet helpen!
Als oplossing vindt men voor deze draak: **b=1.556**

Uiteraard kennen we nu ook α **α=1.95**

Wat we gevonden hebben is de mogelijkheid om het meten van de ρ over te slaan. **Dus we hoeven alleen nog maar de kleinste doorsnede te meten.**

$$\left[\frac{2}{b}\bullet\frac{J1(b)}{J0(b)} - \left[1 + \frac{1}{\exp\left[\frac{(1 - J0(b))}{J0(b)}\right] - 1}\right]\right]\bullet \ln\left[\exp\left[\frac{(1 - J0(b))}{J0(b)}\right]\right] \quad 0$$

We geven nog een beeld van het spanningsverloop in de kleinste doorsnede.



Gevolgen

1. Op pagina 19 vinden we voor de ware rek: $\delta = \ln \frac{L}{L_0}$ en op pagina 20 vinden dat bij de treksterkte geldt: $\delta = n$

Hieruit kunnen we afleiden:

$$\frac{L}{L_0} = e^{n}$$

Uit het constant zijn van het volume (maar het kan ook uit andere plastische formules) vinden we:

$$r_0 = R_1 \bullet e^{\frac{-n}{2}}$$

Met $2R_1$ is de oorspronkelijke doorsnede van de trekstaaf.

Na het insnoeren loopt de trekkracht terug en het gebied buiten de insnoering komt weer in het elastische gebied.

2. Uit de intermitterende trekproef bepalen we de momentane trekkracht en de daarbij behorende minimale diameter dus: P en R ($=D_{min}/2$).

We berekenen met:

en $a \bullet R = b$

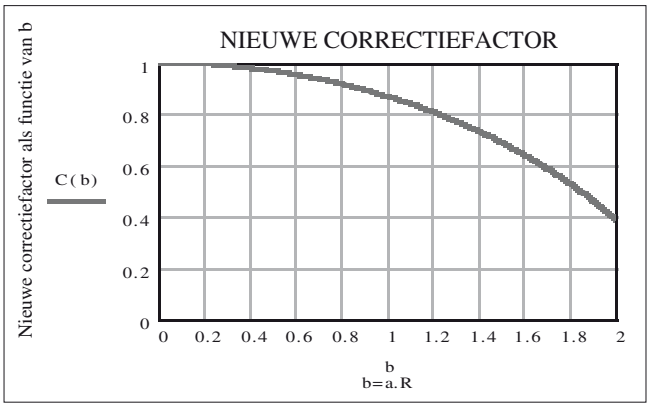
$$P = 2\pi \frac{k\sqrt{3}}{J0(a \bullet R)} \bullet \frac{R}{a} \bullet J1(a \bullet R)$$

de waarde **b.**

Uit $a \bullet R$ bepalen we dan een nieuwe correctiefactor C. Dit doen we op dezelfde wijze als Bridgman dat heeft gedaan (zie pagina 19), en we vinden:

$$C := \frac{b}{2} \bullet \frac{J0(b)}{J1(b)}$$

We vinden dan de volgende grafiek:

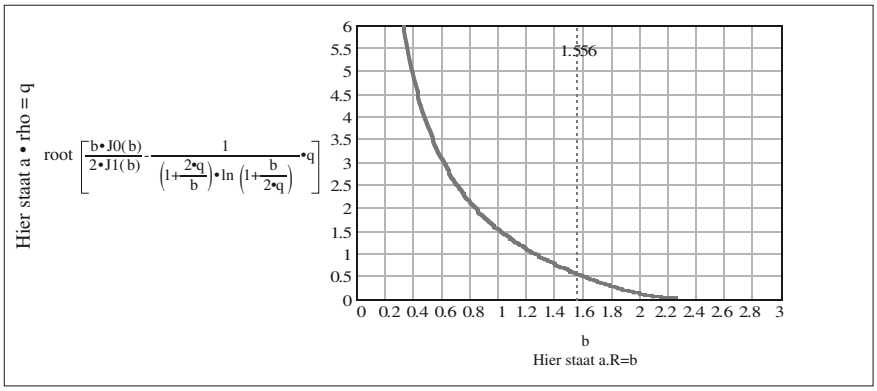


Als we deze grafiek vergelijken met de grafiek van Bridgman dan zien we een afwijkende vorm. Bedenk echter dat de x-as van de grafiek van Bridgman een andere schaal heeft.

We zien dus dat we de meting van ρ niet meer nodig hebben!

3. Het is nu voor de hand liggend om de gegevens van Bridgman te koppelen met de nieuwe gegevens. Dat kan op een aantal manieren die overigens tot hetzelfde resultaat leiden.

We realiseren ons dat de C op precies dezelfde manier



bepaald wordt als de C_B van Bridgman en dus zijn deze twee C's aan elkaar gelijk. Dit geeft ons de mogelijkheid om een verband te leggen tussen R en ρ. Uit $C=C_B$ vinden we:

$$\frac{b \bullet J0(b)}{2 \bullet J1(b)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{2 \bullet r}{R}\right) \bullet \ln\left(1 + \frac{R}{2 \bullet r}\right)}$$

Hiervoor kunnen we schrijven

$$\frac{b \bullet J0(b)}{2 \bullet J1(b)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \bullet a \bullet r}{a \bullet R}\right) \bullet \ln\left(1 + \frac{a \bullet R}{2 \bullet a \bullet r}\right)}$$

Noem a.R=b en a.ρ=q en we vinden:

$$\frac{b \bullet J0(b)}{2 \bullet J1(b)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{2 \bullet q}{b}\right) \bullet \ln\left(1 + \frac{b}{2 \bullet q}\right)}$$

We zien dus een verband tussen q en b. Helaas is het niet mogelijk om q expliciet uit te drukken in b of omgekeerd. Daarom doen we het numeriek via een grafiek (bovenaan pagina 22).

De verticale as ziet er wat griezelig uit, maar het betekent alleen maar dat de functie die hier staat de wortel q bepaalt bij een gekozen b. Kijken we naar het quotiënt:

$$\frac{q}{b} = \frac{a \bullet \rho}{a \bullet R} = \frac{\rho}{R}$$

dan zien we precies de parameter waarmee Bridgman werkt.

Het is duidelijk dat we nog meer wetenswaardigheden kunnen afleiden uit het gevonden verband. Confrontatie met de praktijkproeven is echter veel vruchtbaarder. Een aantal toevallige gegevens die nog beschikbaar waren laten zien dat het prima werkt, maar de echte confrontatie met de praktijk laat ik, noodgedwongen, over aan de echte specialisten.

Conclusies

E is soms niet constant.

Het omklappen van ν van 0.3 naar 0.5 zal niet momentaan gebeuren. Er zal een overgangsgebied zijn waarvan verder niets bekend is.

Het meten van de radius ρ van de insnoering kan achterwege blijven.

Het is kennelijk mogelijk om naast de correctiefactor van Bridgman een andere te vinden. Dit kan een nieuw licht doen schijnen op het insnoeringsgebied.

Wellicht is het mogelijk om het technisch bruikbare plastische gebied iets uit te breiden. Dit valt af te leiden van de voorlaatste grafiek. We zien dat vanaf 0 de lijn een tijd horizontaal blijft tot ~b=0.3.

De waarde van b=1.556 zegt alleen iets over de vergelijking die we gemaakt hebben met de formules van Bridgman, maar heeft geen fundamentele betekenis.

Samenvatting van de intreerede op 22 maart 2001 jl.

Van Eijck benoemd tot hoogleraar

Advanced Mechatronics

Na de formele opening door Van Eijck, waarin hij aangaf dat hij als ontwerpend ingenieur weliswaar geen pakket met publicaties kan overhandigen, maar wel een dossier met schetsen en patenten, en tevens aangaf dat hij trots is op het werk dat ontwerpende ingenieurs leveren, geeft hij een formule, voortkomend uit zijn onderzoek, waarmee de uitvoer van een groep mensen in teamverband kan worden voorspeld.

Deze uitdrukking, zo gaf hij aan, komt complex over. Bij het bestuderen van andere fundamentele wetten kwam hij veel eenvoudiger exemplaren tegen. Van Eijck: “Misschien is eenvoud toch een kenmerk van ware diepgang. Toch geeft deze “Law of Cooperation” mij wel een aardig wiskundig en wetenschappelijk gevoel.” Hierna ging hij snel over op de praktische toepassing van deze wet, voorkomend dat de receptie zou worden gestart voor hij klaar was met zijn rede.

Law of Cooperation

Team Output =

$$\sum_{i=1}^{N}\left(1+\sin\frac{\pi}{2}\left(\frac{IQ_i}{100}-1\right)\right)\times\left(1-\frac{1}{2}e^{-\left(\frac{1}{7}\ln 0.2\right)t_i}\right)$$

$$\times\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(1-e^{-\left(\frac{1}{7}\ln 10\right)t_i}\right)\times\frac{EQ}{100}}$$

$$\times\left(0.298\left[0.918+sign(x-x_m)\left(1-e^{-x_1|x-x_m|}\right)\right]\times\left[0.918+sign(y-y_m)\left(1-e^{-y_1|y-y_m|}\right)\right]\right.$$

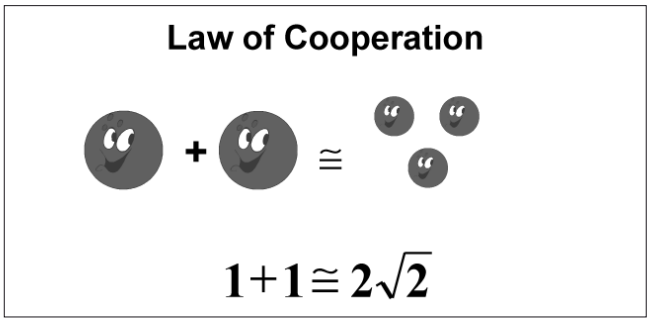
$$\left.\times\ 0.272\left[1.836+sign(x-x_m)\left(1-e^{-x_1|x-x_m|}\right)+sign(y-y_m)\left(1-e^{-y_1|y-y_m|}\right)\right]\right.$$

Praktisch gaf hij de volgende vergelijking. “Als we aannemen dat in een project twee specialisten samenwerken dan leveren zij de input voor de vergelijking. Stellen we dat ze gemiddelde technische vaardigheden, goede samenwerking, geen last van hun management en bekendheid met het werkveld hebben dan zullen zij gezamenlijk een resultaat bereiken dat gelijk is aan dat van drie onafhankelijk werkende deskundigen. Zodoende

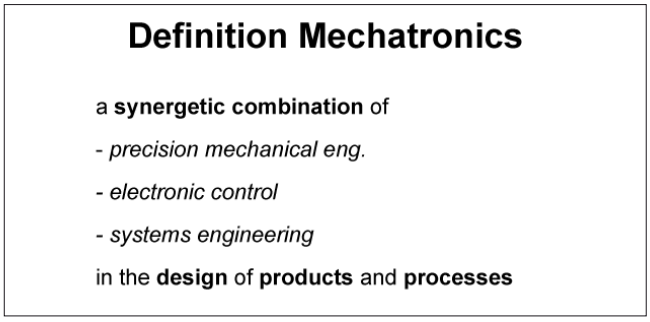
$$a^2 + b^2 = c^2$$

$$e = mc^2 \qquad V = IR$$

$$PV = RT$$



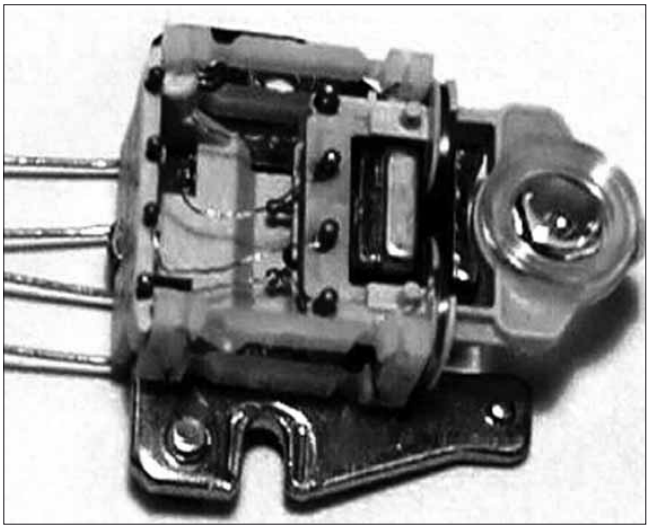
bereiken we de uitdrukking één plus één is drie, hetgeen overeenkomt met algemeen bekende volkswijsheid. Volgens de Law of Cooperation zal het resultaat overigens gelijk zijn aan één plus één is gelijk aan 2√2. Aangezien volkswijsheid natuurlijk ook maar een benadering is kunnen we aannemen dat de gepresenteerde wet de werkelijkheid redelijk benadert."



Na deze uiteenzetting stapte hij terug naar de Mechatronica en haar definitie. Bij de definitie van Mechatronica wordt gesteld dat Mechatronica zich richt op het ontwerp van producten en processen. Belangrijk hierbij is het integrerende aspect in het Systeemontwerp. Bij het ontwerpen van een systeem worden de bijdragen van verschillende technische disciplines op elkaar afgestemd en samengebracht. De technici werkend in dit vak zullen hierbij in staat moeten zijn om overzicht tot stand te brengen. Hij haalde vervolgens enkele voorbeelden aan.

Het eerste voorbeeld komt uit een verrassende hoek. Voor veel mensen is Mechatronica verbonden met producten en systemen met hoge nauwkeurigheid. De bosbouwindustrie in Finland denkt daar anders over. Het door mens en paard laten vellen en transporteren van

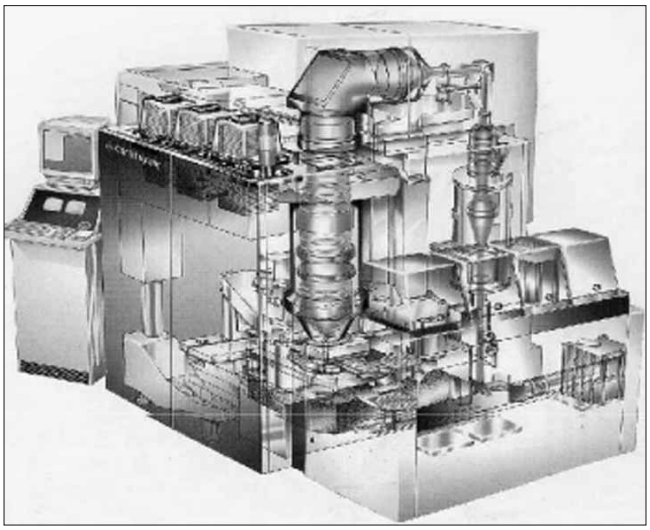
bomen wordt vervangen door een moderne industrie. Geavanceerde werktuigen worden ontwikkeld om het zware werk uit te voeren. De bewegende delen worden aangedreven met hydraulische actuatoren. Sensoren en regelaars besturen de verschillende functies. Om beschadiging van de bosgrond te voorkomen worden zes voeten gebruikt waarvan de beweging door software gecoördineerd moet worden. In andere machines speelt moderne beeldverwerking een grote rol. Op langere termijn denkt men aan machines die op afstand bestuurd en bediend kunnen worden. De combinatie van alle verschillende technieken leidt hier tot innovatieve oplossingen. Bij deze machines is het beheersen van grote krachten belangrijker dan de hoge nauwkeurigheid. In Finland wordt dit werk beschouwd als de kern van Mechatronische ontwikkelingen.



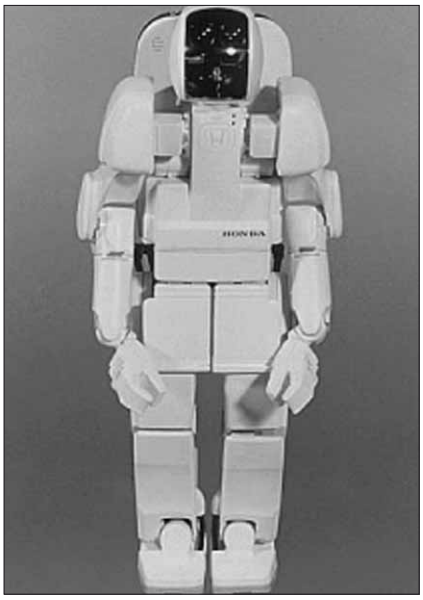
Een geheel ander voorbeeld dat Van Eijck noemde, is de Compact Disc Speler. Met behulp van een gefocusseerde laserbundel wordt het signaal van de schijf omgezet in elektrische signalen. Om de lichtspot op de goede plaats te houden wordt het gereflecteerde licht gemeten. De lichtspot moet het bewegende spoor op de plaat volgen met een toelaatbare afwijking minder dan een micrometer. Om dit te bereiken is een lens geplaatst in een actuator. Hier ziet u de bewegingen van de actuator tijdens het volgen van het spoor. In twee richtingen beweegt de lens ongeveer een halve millimeter. Voor de grote beweging van de spot over de plaat wordt de actuator op een slede geplaatst. Deze slede kan radiaal bewegen om het juiste spoor te bereiken. Tijdens het verplaatsen dient de laserbundel goed gefocusseerd te blijven om het tellen van de passerende sporen mogelijk te maken.

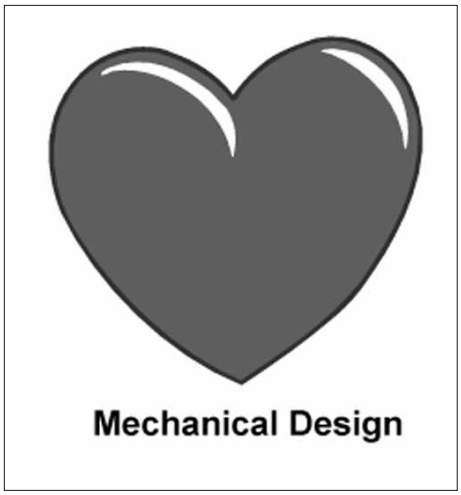
Van Eijck haalde een compleet ander voorbeeld van stal, namelijk dat ook in de plaatsingsmachines voor elektronische componenten de Mechatronica terug is te vinden. De overstap van nokkengestuurde machines naar servogestuurde machines werd in de tachtiger jaren gemaakt. In de Fast Component Mounter worden zestien onafhankelijke manipulatoren gebruikt die gezamenlijk meer dan 60.000 componenten per uur kunnen plaatsen. Elke manipulator heeft vier onafhankelijke bewegingen. De beweging van elk van deze assen wordt geregeld met behulp van sensoren en actuatoren. Snelheid, nauwkeurigheid en betrouwbaarheid hebben van deze machine een succesvol industrieel product gemaakt. Voor het gebruik van deze machine is de besturing essentieel. Bij het ontwerpen van Mechatronische systemen wordt de invloed van integrale software-ontwikkeling steeds groter.

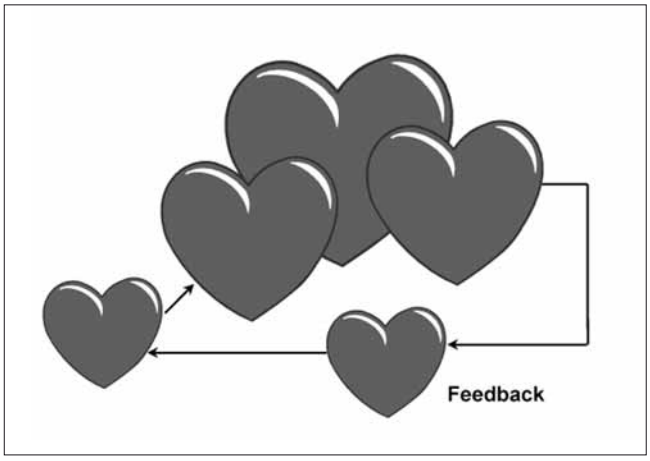
Van Eijck noemde nog een bekend voorbeeld. Namelijk dat van ASML, een bedrijf dat de afgelopen weken veel in de belangstelling heeft gestaan. ASML is, voortbouwend op de ontwerpen uit de Philips Research, in 1984 gestart met de commerciële fabricage van wafersteppers. Het succes is niet onopgemerkt gebleven. Nauwkeurigheid van positioneren is van essentieel belang. De opbrengst van de machine kan vergroot worden door snelle bewegingen te realiseren. Zo werden bij de eerste generatie verplaatsingen van 15 millimeter met nauwkeurigheden van 50 nanometer gemaakt. De benodigde staptijd was slechts 0,3 seconde en de machine kon



60 wafers per uur belichten. Bij de huidige generatie worden nauwkeurigheden van enkele nanometers en opbrengsten van meer dan 100 wafers per uur bereikt. Een ander punt is dat geavanceerde optische scanners het mogelijk maken de maskers op stofdeeltjes te inspecteren. Hierbij beweegt een laserbundel met grote snelheid over het oppervlak. Deze machines laten met andere woorden duidelijk zien hoe de integratie van vele specialismen heeft geleid tot een kennis intensieve industrie met goede groeikansen. Van Eijck denkt dan ook dat nieuwe ontwikkelingen elkaar zeer snel zullen gaan opvolgen.

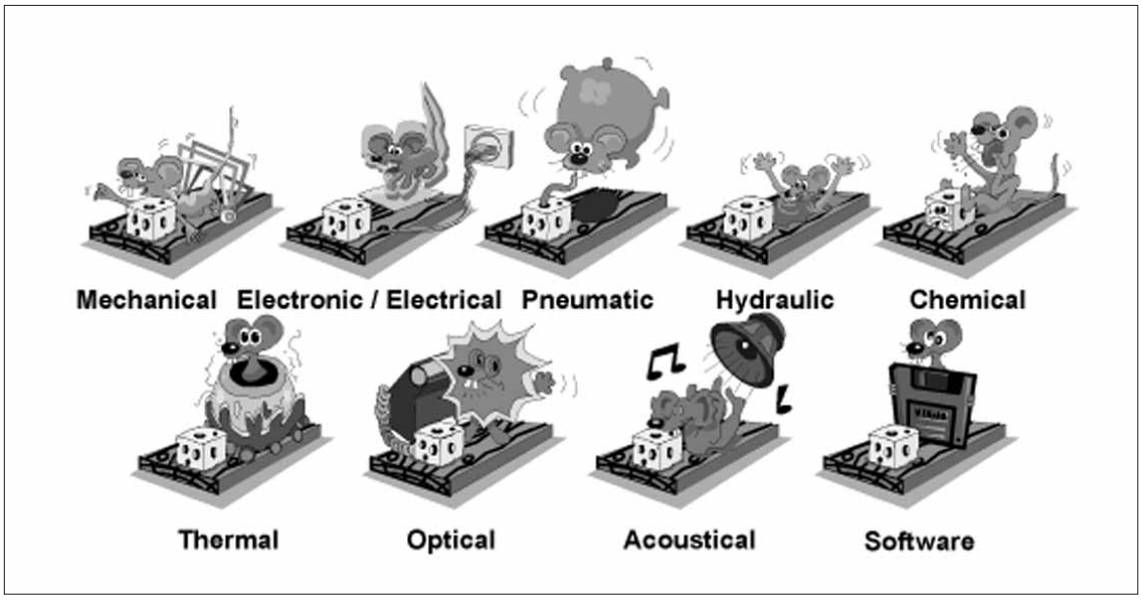






Een ander aspect dat meetelt is dat de rekenkracht en geheugencapaciteit van computers steeds groter worden. Het resultaat is dat we in staat zijn om nog complexere systemen te fabriceren. Van Eijck haalt hier aan dat om de mogelijkheden op dit gebied te onderzoeken er vanuit Japan een uitdagend programma is opgezet. Het doel van dit programma is om in het jaar 2050 een robotvoetbalteam te laten spelen tegen de wereldkampioen voetbal. Wereldwijd spelen teams van universiteiten en instituten tegen elkaar. De winnaars moeten hun ontwerpen openbaar maken en zo bijdragen aan het opbouwen van een kennisdatabase. Momenteel laat de beweging van de robots en hun energiegebruik nog veel te wensen over. De vooruitgang is echter opmerkelijk. Niet alleen het bewegen van de apparaten is interessant. Het model waarop de robots hun samenwerking organiseren, door sommigen aangeduid met Artificial Intelligence, maakt dit programma zeer uitdagend. Ook in Nederland wordt door verschillende groepen aan dit programma gewerkt.

Van Eijck heeft zijn toehoorders met bovenstaande voorbeelden het werkterrein van de Mechatronica van de praktische kant toegelicht. In alle voorbeelden is sprake van bewegende mechanische onderdelen. Voor de werktuigbouwkundige vormt dit het hart van het systeem. Om de onderdelen te bewegen zijn echter wel actuatoren met hun energievoorziening noodzakelijk. Voor de



motorontwerper kan het hart van het systeem dus anders zijn. Voor de werktuigbouwer kan het verdrietig zijn als de motorontwerper dit al te sterk benadrukt. Op gelijke wijze zullen de ontwerper van de sensoren, de regeltechnicus en de besturingsdeskundige hun hart in het systeem leggen. Elk van de deskundigen zal met respect met de anderen om moeten gaan om het ontstaan van gebroken harten en verdriet te voorkomen. De kwaliteit van het geheel is afhankelijk van de bijdragen uit elk veld. Een geniale mechanica met matige elektronica leidt helaas tot een matig resultaat.

Samenwerking, zo zegt Van Eijck, is niet vanzelfsprekend. Organisaties werken veelal vanuit disciplines en de individuele bijdrage van mensen wordt gebruikt voor hun beoordeling. Het gebruikmaken van de resultaten van anderen spreekt minder aan dan het zelf doen van uitvindingen. Ook de opleiding en het onderzoek zijn ondergebracht in gespecialiseerde faculteiten. Deze zullen in concurrentie dingen naar de gunst van studenten en subsidiegevers en dit leidt niet vanzelfsprekend tot samenwerking. Van Eijck illustreerde dit aan de hand van een vijftien jaar oude tekening. Hierin wordt aangegeven hoe verschillende technici een oplossing vinden voor het vangen van een muis, gezien vanuit de traditionele manier van denken.

Law of Cooperation

Team Output =

Technical Skills

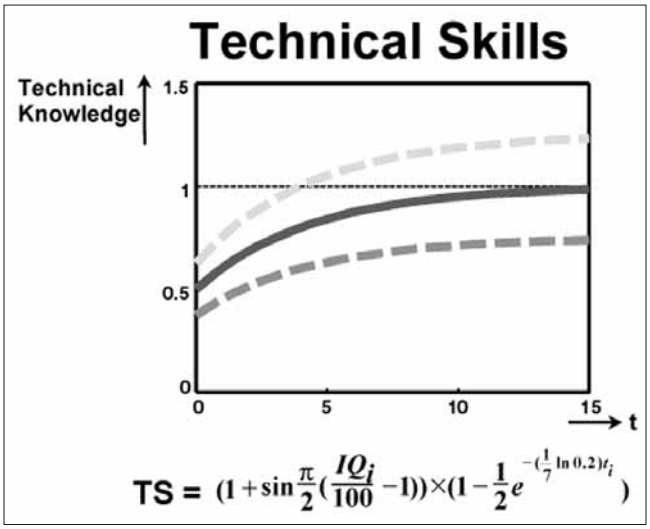
× Mechatronic Skills

× Leadership

× Customer Relations

De Law of Cooperation

Van Eijck komt nu terug op zijn Law of Cooperation. In deze formule wordt uitgerekend hoe groot de output van een team zal zijn als functie van de input. Het resultaat ontstaat als een vermenigvuldiging van vier factoren. De eerste factor hangt af van het aantal medewerkers en hun technische niveau. De tweede factor is ook afhankelijk van het aantal medewerkers en van hun samenwerkingsvaardigheid. De overige twee factoren hebben te maken met leiderschap en de kennis van het toepassingsveld. Van Eijck heeft deze verschillende factoren kort toegelicht.

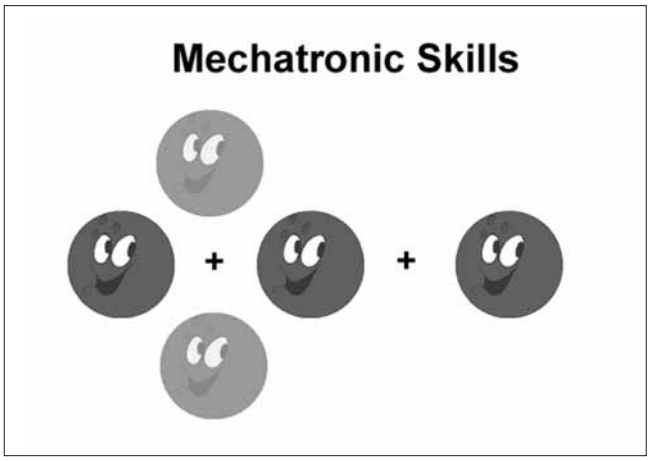


Technische vaardigheden

Elke medewerker in het team zal vanuit zijn opleiding en ervaring een zeker technisch specialisme in het mechatronisch team inbrengen. Voor het bereiken van een goed niveau als ontwerper in enig vakgebied, is een opleiding en ervaringsopbouw van 7 à 14 jaar nodig. Mensen in meer vakken op niveau opleiden gaat dus erg lang duren en levert weinig resultaat op. De spreiding in dit niveau is het gevolg van aanleg, gerepresenteerd door het Intelligentie Quotiënt, maar ook de opleiding en ervaringsopbouw spelen hierin een rol.

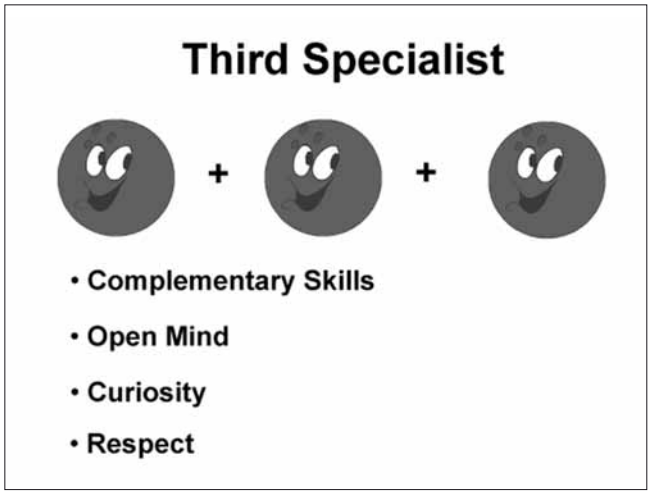
Mechatronische vaardigheden

Naast de technische vaardigheden zijn in een Mechatronisch team ook persoonlijke vaardigheden van groot belang. Van Eijck gaat nu na op welke wijze een derde persoon aan het oorspronkelijke tweetal kan worden toegevoegd. Het is bijvoorbeeld mogelijk de derde persoon als assistent te laten optreden. Ook zou de derde persoon als leider kunnen optreden. En ten slotte is het mogelijk een derde deskundige naast de eerste twee te laten fungeren.



Van Eijck gaat verder: “Het toevoegen van een assistent lijkt aantrekkelijk. Het verhoogt de status van de deskundige en die kan routinetaken delegeren. De assistent kan via het werk in het project kennis overnemen van de deskundige. Het eerste argument, de status, levert in de

Law of Cooperation niet veel op. Wellicht vindt de deskundige het werk nu leuker. Het tweede aspect is echter niet ongevaarlijk. Tijdens het ontwerpen van systemen speelt het creatieve aspect vaak een grote rol. In veel gevallen ontstaan echte vindingen op momenten dat iemand niet “hard aan het werk” is. Professor Wim van der Hoek besprak deze relatie tussen werkdruk en creativiteit in detail met zijn studenten. Het is mijn persoonlijke ervaring dat de geest tijdens het uitvoeren van routinewerkzaamheden bevrijd wordt en creatieve vindingen kunnen ontstaan. Het zou dan ook verstandig kunnen zijn om deskundigen te verplichten om koffie te maken, af te wassen en hun overhemden te strijken. Natuurlijk

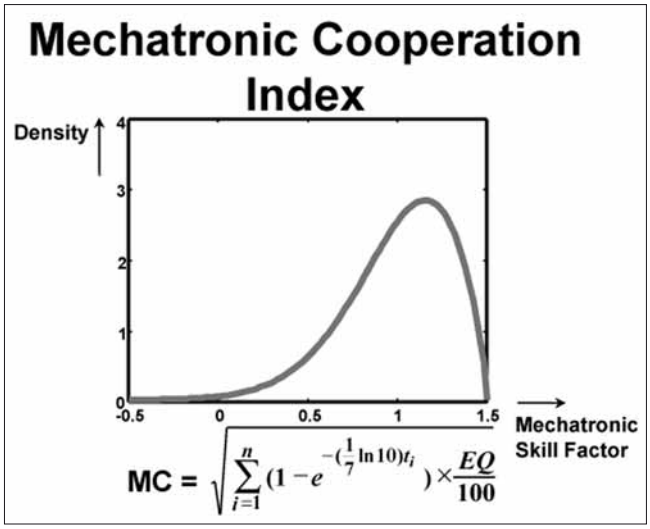


blijft het aantrekkelijk jonge mensen met ervaren deskundigen te laten samenwerken. Dit moet echter niet ontaarden in het overdragen van uitsluitend routinetaken.”

Van Eijck vervolgt: “Het toevoegen van een leider aan een team van twee deskundigen lijkt niet aantrekkelijk. Het werken in zelfsturende teams is effectiever, omdat de vooruitgang beter is als telkens diegene het voortouw heeft die op dat moment de meest wezenlijke bijdrage levert. Alleen voor grotere teams is een projectleider zinvol, omdat voor grotere teams de synchronisatie en structuuraspecten van de samenwerking meer van belang worden voor goede voortgang van het werk. Voor bijdragen aan Mechatronische projecten is het verstandig

als de projectleider ook inhoudelijk aan de ontwikkeling kan bijdragen. Naast de projectleiding zal in organisaties natuurlijk een structuur voor coaching en (op)leiding aanwezig zijn. Deze wordt niet als meewerkend in het project beschouwd."

Van Eijck vervolgt met de derde mogelijkheid. "Het toevoegen van een derde specialist eist enige aandacht. Het helpt niet als de nieuwe man gaat concurreren met een van de bestaande mensen. Aanvullende vaardigheden zijn gewenst. Daarnaast wordt van alle drie een open instelling gevraagd om elkaar goed te informeren. Een gezonde dosis nieuwsgierigheid naar en respect voor het werk van de anderen is hierbij onontbeerlijk. Het aanleren van dergelijke vaardigheden is niet eenvoudig. De ervaringen die de afgelopen tien jaar zijn opgedaan met projectgericht onderwijs geven echter aan dat er wel



resultaat geboekt kan worden. In toenemende mate hebben afgestudeerden goede vaardigheden om zichzelf en hun werk met zelfvertrouwen te presenteren."

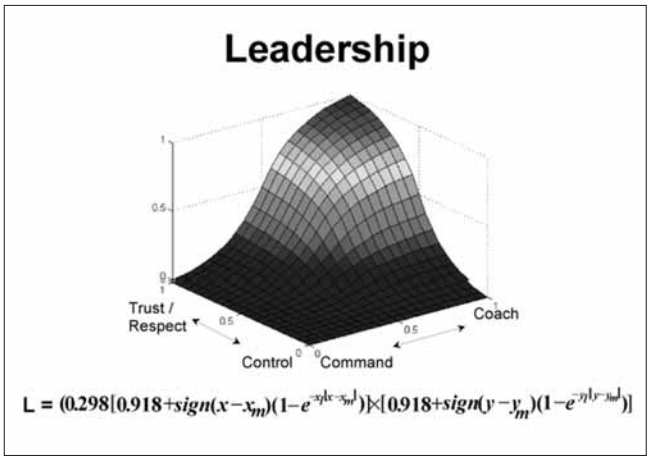
Om dit aspect wiskundig te maken, kan onder andere gebruikgemaakt worden van het Emotioneel Intelligentie Quotiënt. Bij grote groepen zal men een statistische benadering voor de bepaling van de Mechatronische samenwerkingsindex van een persoon kunnen hanteren. De kansdichtheidsverdeling voor deze samenwerkingsindex kan gepresenteerd worden door een bewerkte Weibull-verdeling. Hiermee kan men een relatie proberen te leggen tussen deze index en de kans dat iemand een hogere of lagere waarde zal hebben. In deze verdeling staat langs de horizontale as de Mechatronische samenwerkingsindex. Het oppervlak onder de verdeling geeft aan in hoeveel procent van de gevallen de index beneden een bepaalde waarde zal liggen. Te zien is dat ongeveer 50 % van de mensen een index lager dan 1 zullen hebben. Gelukkig heeft de andere helft een hogere waarde. Opvallend is nog dat er een kleine kans is dat iemand een negatieve index heeft. Een dergelijk persoon zal het werk van het team sterk negatief beïnvloeden. Van Eijck memoreerde in dit licht ook de intreerede van professor Rien Koster. Koster suggereerde dat er geen lessen nodig zijn om te leren samenwerken. Hij denkt dat dit vanzelf wordt overgenomen in omgevingen waar het goede voorbeeld wordt gegeven. Dat dergelijke omgevingen niet vanzelf ontstaan, had Van Eijck met de muizenvallen al getoond. Van Eijck neemt de vrijheid om het met professor Koster oneens te zijn. Van Eijck meent namelijk dat colleges kunnen bijdragen tot het verbeteren van communicatie over grenzen van disciplines en wederzijds respect kan worden getoond en ontwikkeld. Van Eijck wil zich dan ook de komende jaren verplichten tot het verzorgen van dergelijke colleges.

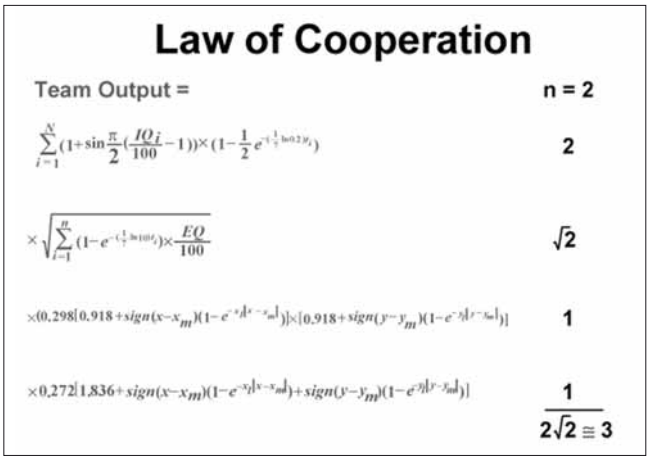
Leadership

Command	vs	Coach
Control	vs	Trust and Respect

Leiderschap

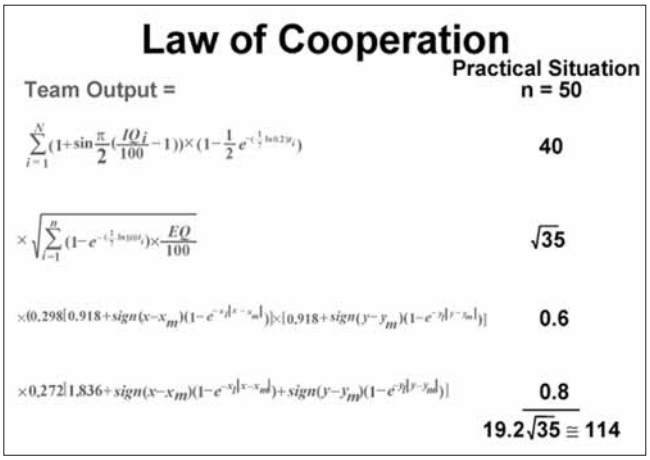
De volgende factor in de formule van Van Eijck heeft te maken met het leiderschap binnen de organisatie. De deskundigen moeten zeer zelfstandig kunnen opereren en vol zelfvertrouwen complexe beslissingen kunnen nemen. Vaak zullen zij op intuïtie en ervaring moeten vertrouwen om niet eindeloos beslissingen uit te stellen.

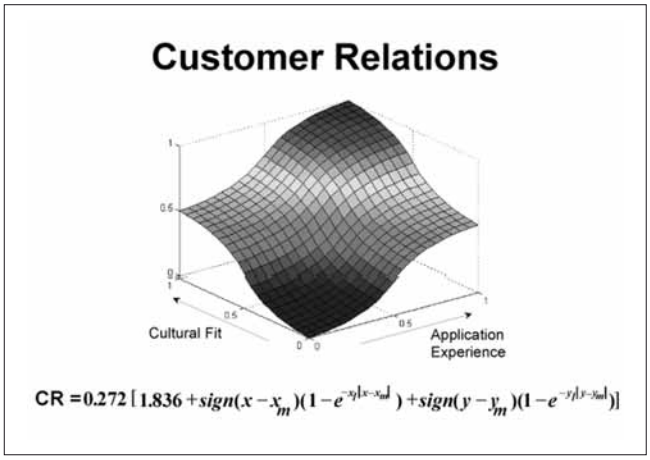




Wat valt er dan nog te leiden, vraagt men zich af?

Realiseer wel dat de onzekerheid voor de managers soms nog groter is. Wat doen ze daar in dat project? Ik snap het niet echt? Het is verleidelijk om in deze onzekerheid iets te doen. Afdwingen van bepaalde zaken en het afrekenen bij tegenslagen zijn dan aantrekkelijk. Dat dit niet goed past bij de beschreven deskundigen lijkt duidelijk. Van Eijck duidt aan dat de stijl van leidinggeven langs twee assen kan worden gekarakteriseerd: een as van commanderen naar coachen en een as van controleren naar vertrouwen en respecteren.





Customer Relations

Van Eijck noemt het werkveld als de laatste factor in de wet van de samenwerking. De oplossingen die in een team ontwikkeld worden, zullen in een bepaalde omgeving moeten worden toegepast. De deskundigen zullen de bestaansvoorwaarden in die omgeving moeten kennen. Het verkrijgen van de nodige informatie kan via het selecteren van mensen met de juiste ervaring. Van Eijck noemt in dit verband ook nog een andere manier. Deze manier vertrouwt op de vaardigheid van de deskundigen om informatie van klanten uit het toepassingsveld te verkrijgen. De moeilijkheden bij dit proces worden groter als de culturele normen en waarden verder uit elkaar liggen. Voor de Klanten Relatie index zijn deze twee aspecten, applicatie ervaring en culturele aansluiting, te gebruiken.

Law of Cooperation in werking

De verschillende factoren in de Law of Cooperation zijn nu besproken. Nu kunnen we bekijken welke gevolgen zij hebben. Allereerst gaan we kijken naar het geval waar

twee deskundigen samenwerken. Ieder heeft een technische vaardigheid gelijk aan 1. Ook voor de samenwerking wordt hun vaardigheid gelijk aan 1 gesteld en gezamenlijk levert dat een factor √2 op. Als we uitgaan van ideaal leiderschap en kennis van de applicatie, resulteert dit in een eindresultaat gelijk aan 2√2. Hetgeen dicht ligt bij de uitdrukking 1+1=3. Het wordt interessant om na te gaan wat er gebeurt bij grotere teams. Bij vijftig personen zal de ideale situatie niet makkelijk bereikt worden. In het grote team zal een mengeling van ervaren en onervaren mensen werken en gemiddeld zal het technisch niveau lager dan 1 uitkomen. Ook het samenwerken en communiceren in grotere teams zorgt voor een lagere dan maximale Mechatronische samenwerkingsindex. De ideale waarden voor het Leiderschap en de kennis van het Klantenveld zullen niet altijd bereikt worden. Met praktische waarden resulteert een team output gelijk aan die van ongeveer 114 onafhankelijk werkende personen. Door samenwerking is de opbrengst van de inspanningen hier dus toch meer dan verdubbeld ten opzichte van een aantal onafhankelijk werkende specialisten. Aan deze waarden is ook direct te zien waar grote winsten te bereiken zijn. Selectie van mensen met goede samenwerkingsvaardigheden en het ontwikkelen van een geschikte stijl van leidinggeven, kunnen nog verdere groei mogelijk maken. Het omgekeerde is natuurlijk ook geldig. Het verkopen van projectgroepen aan klanten kan zeer profijtelijk zijn. Het overtuigen van de klanten dat ze de extra waarde voor een deel zullen moeten betalen, is soms niet zo eenvoudig. In ieder geval blijkt het voor technici veel plezier op te leveren als zij gezamenlijk snel een goed resultaat kunnen neerzetten.

Binnen Philips werd deze gedachte in 1993 met behulp van een sprookje aan alle medewerkers uitgelegd. Het bouwen van een kasteel met een strikt verticale projectorganisatie bleek heel moeilijk. In het sprookje zijn wonderen mogelijk en door het invoeren van communicatie over de grenzen van disciplines ontstond toch een happy end.

L.O.C. in Advanced Mechatronics

- Team Research
  - Mastering Machine
  - Micro Mechatronic Systems Design and Assembly

Het onderliggende principe is ook buiten de Mechatronische ontwikkeling van toepassing. In de afgelopen jaren is veel aandacht ontstaan voor de principes van Concurrent Engineering en Lean Manufacturing, die beide gebaseerd zijn op nauwere samenwerking tussen respectievelijk bedrijfsfuncties en bedrijven onderling.

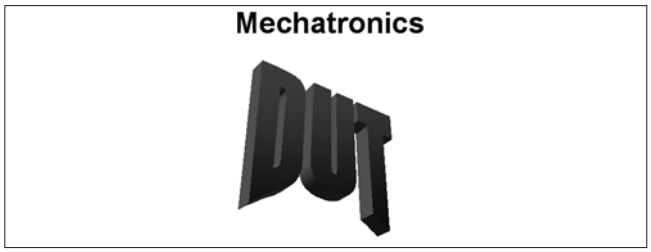
L.O.C. in the University

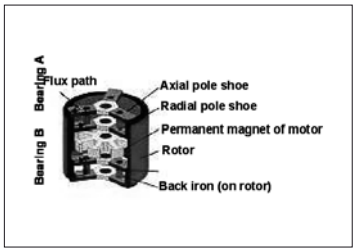
- Specialization
- Cost - Reduction
- Competition
- Cooperation ?

Mechatronisch Onderzoek en Onderwijs

Tot slot ging Van Eijck in op hoe hij zijn deeltijd als hoogleraar inhoud zou willen geven. In eerste instantie hoopt hij een bijdrage te kunnen leveren aan het toepassen van modelvorming in de conceptfase. Deze modelvorming is sterk afhankelijk van het vakmanschap van de ontwerper. Ook wil hij dat studenten met respect met de bijdragen van andere disciplines omgaan. Het wegnemen van taalbarrières is een voorbeeld.

Het woord “Advanced” in de naam van de groep geeft aan dat het onderzoek zich zal richten op het verleggen





van grenzen van de prestaties van Mechatronische systemen. Het eerste onderzoek waaraan Van Eijck en zijn studenten zijn begonnen, richt zich op het gebruik van elektromagnetische lageringen voor het maken van een Mastering machine voor optische platen. De gewenste nauwkeurigheden worden hierbij in nanometers uitgedrukt. Aan dit project werken vier promovendi met verschillende achtergronden.
Voor het tweede onderzoeksproject wordt met een aantal andere groepen samengewerkt. Van Eijck verwacht ongeveer zeven promovendi aan het werk te zetten om het ontwerpen en assembleren van micromechatronische systemen te onderzoeken. Een ander voorbeeld is het ontwerpen van microsystemen die als kunstmatige insecten kunnen worden gebruikt. Het onderzoeken van de fundamentele oplossingen om basisfuncties voor dit soort zaken te ontwerpen, is volgens Van Eijck een zeer geschikt speerpunt voor het onderzoek.
Ten slotte zegt Van Eijck: “Enkele opmerkingen zijn op zijn plaats. De uitgangspunten van de Law of Cooperation zijn mijns inziens geldig. De wiskundige onderbouwing die hier werd gepresenteerd, was slechts bedoeld als verluchtiging en als rode draad in het verhaal. Het is niet mijn vak dit soort zaken diepgaand te onderzoeken. Wellicht dat andere onderzoekers ooit een wiskundige onderbouwing kunnen vinden van mijn intuïtieve benadering. Ik hoop dat u niet te veel aandacht heeft besteed aan het bestuderen of onthouden van de gepresenteerde formules.”

Als laatste sprak Van Eijck een dankwoord uit aan zowel het Bestuur van de Technische Universiteit Delft, zijn collega’s van andere faculteiten en universiteiten, de medewerkers van de faculteit Ontwerp, Constructie en Productie, de medewerkers en leiding van Philips CFT en van haar klanten, aan Rien Koster en Wim van der Hoek.

Onderhoud website zonder ICT-kennis

ASPerience BV uit Wageningen heeft een product ontwikkeld waarmee de marketing- of communicatieafdeling zelf de redactie kan voeren over de inhoud van de eigen website, zonder dat hiervoor ICT-kennis nodig is. Het product, ASPerience Web, is een "content management systeem" gebaseerd op de laatste databasetechnologie met de daarbijbehorende optimale informatiebeveiliging. ASPerience Web bestaat uit een modulair programma, werkend als een tekstverwerker. Hiermee kunnen alle voorkomende werkzaamheden die een bedrijf via de website wil communiceren, veranderd worden. Het gaat hierbij om tekst invoeren en veranderen, plaatjes inplakken, prijzen aanpassen en bestanden koppelen.

M-IMS

De M-IMS serie lineaire sledes vult de M-ILS serie aan met grotere slaglengtes van 300 tot 600 mm. Deze zijn ontworpen op robuustheid en prestaties bij relatief lage prijs. De IMS wordt toegepast voor precisie industriële en researchdoeleinden. De technologie achter de ILS wordt ook hier ingezet, een geoptimaliseerd zeer stijf aluminium geëxtrudeerd profiel. Buigeffecten als gevolg van verschillende thermische uitzettingscoëfficiënten van aluminium en de stalen rails zijn geminimaliseerd. De kogelomloopgeleidingen maken een accurate lineaire beweging mogelijk. Een zeer stijve spelingsvrije kogelomloopspindel zorgt voor snelle bewegingen met korte acceleratie- en deceleratietijden en lage warmteontwikkeling, hetgeen de levensduur vergroot. Positiemelding

geschiedt door een direct op de spindel gemonteerde encoder met 4000 pulsen per omwenteling. Voor nog hogere precisiedoeleinden is een lineaire encoder realiseerbaar met 0.1 micron increment. Eindschakelaars en nulpuntschakelaar zijn aanwezig alsmede op elastomeren gebaseerde mechanische eindstops.

Euspen congres

Hieronder vindt u een vooraankondiging over het euspen congres dat van 26 tot 30 mei 2002 wordt gehouden. Aangezien het een internationaal congres betreft en de voertaal Engels is, is de vooraankondiging ook in het Engels geplaatst. Op de website euspen2002.wtb.tue.nl (dus zonder www ervoor!) vindt u uitgebreidere informatie over het congres.

3rd International euspen conference
Eindhoven University of Technology,
Eindhoven, The Netherlands

Introduction
The ever increasing demand for higher precision in manufacturing continues unabated, with the aim of achieving higher quality, reliability and efficiency of operation of products. Additionally, the rapidly growing impetus for miniaturisation offering the economic benefits of "smaller, faster, cheaper" also demands higher precision equipment and processes. This calls for close working relationships and efficient networking between those working in precision engineering, micro-engineering (MST/MEMS) and nanotechnology. The European Society for Precision Engineering and Nanotechnology addresses a wide range of the ultra-precision technologies and provides an efficient networking service to its members. European Commissioner Philippe Busquin will visit the conference.

When?
Tutorials: sunday may 26th 2002
Conference: may 27th - may 29th 2002
Industrial visits: may 30th 2002

Topics
The 3rd euspen Conference will cover new developments for process technology, machine tools and metrology in precision engineering and nano-technology.

1. Application of precision engineering design principles
2. Precision mechatronic design
3. Micro/nano systems
4. Ultra-precision motion systems
5. Precision Engineering manufacturing methods/processes
6. Micro fabrication and manipulation
7. Precision and nano metrology for machines/manufacturing
8. Material properties

Registration
The conference registration form and other forms can be downloaded from the website: euspen2002.wtb.tue.nl, or they can be requested at the conference office:
euspen 2002 conference secretariat
Mrs. M. Aarts,
Eindhoven University of Technology,
Faculty of Mechanical Engineering,
Section Precision Engineering
P.O. Box 513,
5600 MB Eindhoven,
The Netherlands
Tel: -31-40-247 2620
E-mail: M.G.M.W.Aarts@tue.nl

Ledenadministratie NVPT

Bij het verzenden van de uitnodiging voor de Algemene Ledenvergadering van de NVPT zijn een aantal adressen retour verzonden. Blijkbaar zijn deze leden verhuisd of van baan veranderd. Bij het secretariaat is daar echter niets over bekend, met als gevolg dat het ledenbestand enigszins vervuild is. De NVPT wil daar graag iets aan doen. Daarom noemen wij hier de betreffende namen en bijbehorende adressen. Als u iets weet over een van deze personen, wilt u dan contact opnemen met het secretariaat van de NVPT? Het telefoonnummer is: 073 – 623 35 62. E-mail: office@nvpt.nl

ROC Zadkine
Vestiging Christiaan Huygensschool
t.a.v. de heer P. van Gemert
Benthemstraat 15
3032 AA Rotterdam

De heer ing. J.G. Pistor
De Kersenboomstraat 25
1551 BV Westzaan

De heer S.H.M. Hulsman
Elisabethstraat 65
7555 JD Hengelo

De heer J. van Puyvelde
Norbertijnenstraat 48
6166 AK Geleen

SENTER
t.a.v. de heer dr. ir. A.P. Hulst
Postbus 30732
2500 GS Den Haag

ECN
t.a.v. de heer B.P.R. Dreyer
Postbus 1
1755 ZG Petten

De heer J. Alem
Apollostraat 77
3054 TA Rotterdam

TU/e technische universiteit eindhoven

Gevraagd: ***Instrumentmaker en Instrumentmaker/ontwikkelaar***

Bent u op zoek naar een nieuwe technische uitdaging in een breed en variërend werkgebied?

De Gemeenschappelijke Technische Dienst:

De Gemeenschappelijke Technische Dienst levert technische ondersteuning voor onderzoeksactiviteiten op de TUE. In een aantal vakdisciplines (mechanisch/ elektronisch/ fysisch/ software/ informatica/ besturingstechnologie) wordt geïntegreerd gewerkt aan:

- Experimenteel ontwerpen en bouwen van apparatuur ten behoeve van het wetenschappelijk onderzoek (Experimentele instrumentenbouw)
- Leveren van gespecialiseerde, hoogwaardige technologie en service aan experimentele opstellingen op locatie.

De instrumentmakerij van de GTD bestaat uit een groep van circa 10 personen die de beschikking hebben over een modern en uitgebreid machinepark. Een instrumentmaker is meestal van idee tot oplevering betrokken en verantwoordelijk voor een proefopstelling of instrument. Hij werkt hierbij nauw samen met de andere vakdisciplines en de onderzoekers.

Taken:

- Ontwikkelen en vervaardigen van unieke instrumenten:
  - Adviseren en voorbereiden
  - Tekenen, berekenen en construeren (Autocad)
  - Vervaardigen, waaronder precisie bewerken en verbinden
  - Assembleren, waaronder micromontage in een stofarme ruimte
  - Technisch documenteren
  - Ontwikkelen van nieuwe technologieën

Gewenst profiel:

- MTS-Fijnmechanische Techniek, liefst aangevuld met LIS, metaal B en enige jaren ervaring in het vakgebied.
- Indien u naast de bovengenoemde capaciteiten ook goede leidinggevende kwalificaties bezit bestaat de mogelijkheid t.z.t. de groepsleider op te volgen.

Arbeidsvoorwaarden:

Een aanstelling voor een proefperiode van maximaal 2 jaar met uitzicht op een vast dienstverband bij gebleken geschiktheid. Een maximaal te bereiken salaris van f6275,- bruto per maand. Aantrekkelijke secundaire arbeidsvoorwaarden waaronder flexibele werktijden, kinderopvang, werknemersparen en uitstekende sportfaciliteiten enz.

Uw schriftelijke sollicitatie met uitgebreid CV kunt u tot 14 dagen na de verschijningsdatum sturen naar de Technische Universiteit Eindhoven t.a.v. ir. P. Brinkgreve, hoofd Gemeenschappelijke Technische Dienst, Postbus 513, 5600 MB Eindhoven onder vermelding van vacaturenummer V88-40/003.
Voor aanvullende informatie kunt u bellen: T.M. Maas groepsleider instrumentmakerij, tel. 040-2472731, ir. P. Brinkgreve, hoofd GTD, tel. 040-2473651. Of surf naar www.tue.nl of www.tue.nl/gtd