

Precision engineering : werken aan grenzen

Citation for published version (APA):

Schellekens, P. H. J. (1992). *Precision engineering : werken aan grenzen*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1992

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Precision
Engineering:

Werken aan
grenzen

INTREEREDE

Prof.dr.ir. P.H.J. Schellekens



Technische Universiteit Eindhoven

INTREEREDE

Uitgesproken op 8 mei 1992 aan de
Technische Universiteit Eindhoven.

Prof.dr.ir. P.H.J. Schellekens

Mijnheer de Rector Magnificus,
Dames en Heren,

De Technische Universiteit Eindhoven heeft per 1 mei 1991 de leerstoel Precision Engineering ingesteld. Het is de eerste leerstoel in Nederland van die naam en er moet worden vastgesteld dat er, over de wereld verspreid, slechts een zeer beperkt aantal zijn. En dit op een vakgebied dat een zeer lange historie heeft, vooral via deelgebieden als de instrumentenbouw, de mechanische metrologie en de precisiewerkingstechnologie.

Het laatste decennium is er vooral in de Verenigde Staten en West-Europa een streven ontstaan om die activiteiten die aantoonbaar te maken hadden met verhoging van de precisie in de techniek, te bundelen.

Dit leidde tot het ontstaan van nationale en internationale organisaties, zoals de American Society for Precision Engineering en de International Precision Engineering Seminars in West-Europa. Deze organisaties hebben een zeer open structuur en hun bijeenkomsten en conferenties worden bezocht door wetenschappers en technici uit de gehele wereld.

Precision Engineering wordt in Japan gedoceerd op een aantal universiteiten waaronder Tokyo University, in de USA op North Carolina State University en in Engeland op het Cranfield Institute of Technology.

In ons land werd tot nu Precision Engineering op de Technische Universiteiten vooral via verwante vakgebieden bewerkt, zoals Fijnmechanische Techniek en Geometrische Meettechniek.

In de industrie is allereerst Philips van belang voor het vakgebied. In dit bedrijf is, vooral in het Natuurkundig Laboratorium en in het Centrum voor Fabricage Technieken beide te Eindhoven, het gehele vakgebied vertegenwoordigd. Het meest sprekende voorbeeld van Precision Engineering is wel de waferstepper die nu bij ASM-L in Veldhoven verder wordt ontwikkeld en geproduceerd.

De TUE heeft vanaf het begin een aantal elementen van Precision Engineering binnen zijn muren gehad, vooral in de faculteit Werktuigbouwkunde. Allereerst is daar het vakgebied Geometrische Meettechniek gesticht door wijlen Prof. dr. P.C. Veenstra en opgebouwd door mijn leermeester Jaap Koning. Daarnaast is een aantal jaren een deeltijdsleerstoel Fijnmechanische Techniek bezet geweest door Muller en later De Jong. Van zeer groot belang was ook de leerstoel Werktuigbouwkundig Construeren die Van der Hoek invulde via het construeren gericht op hoge positioneringsnauwkeurigheid. Zijn opvolger Koster heeft deze kennis verder uitgebreid en verfijnd.

In onze vakgroep Produktietechnologie en Automatisering is veel aandacht besteed aan de proceskant van precisiewerken, vooral het draaiproces. Dit onderzoek, verricht met

steun van de Nederlandse Philipsbedrijven, wordt geleid door Kals en van der Wolf.

Het is aan mij om in de nieuwe leerstoel deze activiteiten te bundelen, uit te bouwen en nieuwe te ontwikkelen, zodat met recht van Precision Engineering kan worden gesproken.

Vandaag zal ik u de contouren van het vakgebied tonen daarbij ook aandacht bestedend aan onderzoek en onderwijs.

PRECISION ENGINEERING IN EEN HISTORISCH PERSPECTIEF

Zoals reeds is aangegeven kent Precision Engineering een verzameling activiteiten die één ding gemeen hebben: verhoging van de precisie van producten via de ontwikkeling van specifieke instrumenten, machines en technologie.

Precision Engineering werd, en wordt, vooral bedreven in de volgende gebieden:

- klokken- en horloge-industrie,
- astronomie (ruimtevaart),
- wetenschappelijke en technische metrologie, vooral de ontwikkeling van standaarden en meetapparatuur,
- instrumentenbouw,
- bouw van meet- en precisiebewerkingsmachines,
- productie van optische componenten en spiegels.

Men mag stellen dat hier de wortels liggen voor het huidige vakgebied Precision Engineering.

Evans¹ haalt vooral de klokken- en horloge-industrie aan als de basis voor het ontstaan van Precision Engineering.

Mumford² stelt het in dit verband wel erg extreem:

"De klok en niet de stoommachine is de sleutelmachine voor de moderne industriële tijd. De klok is de belangrijkste machine geweest voor de moderne techniek en was een voorbeeld voor vele soorten mechanismen. Ook de indirecte invloed was groot als het eerste werkende precisie-instrument en het zette de lijnen voor nauwkeurigheid en afwerking voor toekomstige instrumenten..."

Een van de belangrijkste vertegenwoordigers van het huidige Precision Engineering, McKeown, ziet het heel anders³:

"In de laatste twintig jaar heeft de toenemende toepassing van de Metrologie bij het vervaardigen aanleiding gegeven tot het opnieuw groeperen van wetenschappelijke en technische kennis: **"Precision Engineering"**.

Hiermee zou het een nieuw vakgebied zijn. Als men echter bedenkt dat de Japanese Society of Precision Engineering in 1933 is opgericht, lijkt deze redenering niet geheel juist of alleen te gelden voor de westerse wereld!

Het is daarom beter terug te keren tot de historische lijn en vast te stellen dat ook de astronomie van groot belang is geweest voor de ontwikkeling van het vakgebied. Uiteraard speelden uurwerken een belangrijke rol bij de bestudering van het gedrag van hemellichamen. Daarnaast vroeg de astronomie om precisie-instrumenten en optische componenten. Deze moesten worden gebouwd op basis van specificaties van de astronomen waarbij dikwijls zowel de vervaardigingstechniek als de machines moesten worden ontwikkeld. In dit verband moet de naam van Jesse Ramsden worden genoemd die in 1762 een eigen bedrijf stichtte dat zich richtte op Precision Engineering. Hij ontwikkelde allerlei nieuwe apparatuur, meestal in opdracht, zoals sextanten, balansen, pyrometers, theodolieten en een grote telescoop voor het observatorium te Dublin. Ook ontwikkelde hij verdeelmachines voor het aanbrengen van zowel lineaire als cirkelvormige schaalverdelingen.

Deze ontwikkeling startte een hele reeks van activiteiten die uitmondde in nieuwe (precisie)-machines en instrumenten. Hierbij ontstonden ook diverse constructieve concepten die de basis vormden voor de bouw van machines.

Robert Willis⁴ heeft in dit gebied grote bekendheid verworven vooral via zijn boek "Principles of Mechanism" uitgebracht in 1841 en de publicatie waarin hij zijn experimenten met een luchtlager beschrijft. Met dit laatste

werk heeft hij de basis gelegd voor zeer veel onderzoek, dat de laatste decennia eigenlijk opnieuw ontdekt is, vooral door de toepassing van lucht-lagers in allerlei precisiemachines, instrumenten en computerapparatuur. Van enorm belang voor de Precision Engineering in het algemeen en de Metrologie in het bijzonder was het wetenschappelijke werk van Adam Michelson die de basis legde voor de hedendaagse interferometrie. Hij gaf al rond 1900 aan dat nauwkeurige lengtemeting het best kon worden uitgevoerd met interferometrie en bouwde de daarvoor benodigde interferometer inclusief de optische componenten. Hij gebruikte deze onder andere voor het meten van de toenmalige lengtestandaard⁵.

Michelson maakte daarbij gebruik van verschillende golflengten en drukte de lengtestandaard uit in de golflengte van rood, groen en blauw licht van een cadmium lamp. Uit zijn experimenten concludeerde Michelson dat het verstandig was de lengtestandaard te baseren op de golflengte van een lichtbron, bijvoorbeeld de straling van een cadmium lamp.

Pas in 1960 werd dit principe gerealiseerd via de oranje-rode straling van een krypton lamp zoals deze was ontwikkeld door Engelhardt⁶ in Braunschweig. In 1983 is deze standaard weer vervangen door een laserlichtbron waarvan verschillende versies zijn ontwikkeld in diverse laboratoria. De Nederlandse versie is in ons laboratorium ontwikkeld en was de basis voor mijn promotiewerk.

Tegen het einde van de vorige en begin deze eeuw ontstonden industriële vestigingen die zich richtten op de ontwikkeling van precisie-instrumenten en machines. Zeer belangrijk waren in dit verband Carl Zeiss Jena, SIP Geneve, Rank Taylor Hobson, Leicester (UK), en Moore Special Tools, Bridgeport (USA).

Bij Carl Zeiss richtte men zich vooral op de fysische en geometrische meettechniek, terwijl bij SIP en Moore veel meer de nadruk op precisie-bewerkingsmachines lag.

Bekend zijn hier de concepten voor coördinaten boormachines die bij SIP ontstonden en nu nog worden toegepast in bijvoorbeeld precisie-meetmachines zoals de Leitz PMM serie.

Interessant is hier het mechanisch correctiesysteem voor spindelafwijkingen dat door SIP werd toegepast. Dit kan beschouwd worden als de voorloper van hedendaagse correctietechnieken voor mechanische afwijkingen in machines.

Het bedrijf van Carl Zeiss werd pas echt succesvol nadat hij in 1866 was gaan samenwerken met Ernst Abbe. Abbe is in de metrologie vooral bekend geworden door het door hem ontwikkelde principe waarin hij stelt:

"Langenvergleiche sind nur dann unabhängig von Führungsfehler, wenn der Abstand zwischen der Messstrecke und der Vergleichsstrecke Null ist."

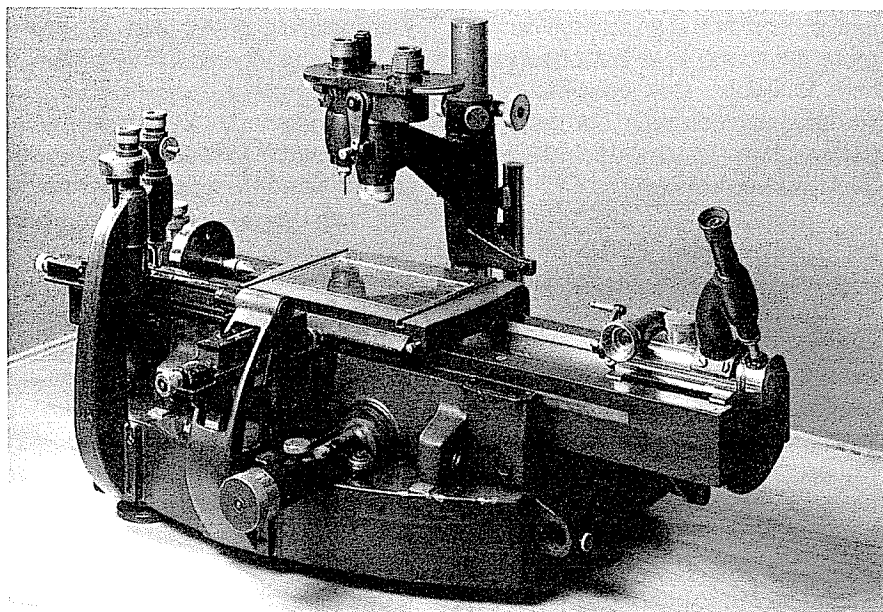


Fig. 1 2D-coördinatenmeetmachine van Zeiss (1926).

Daarnaast zijn door Abbe en medewerkers een groot aantal meetinstrumenten ontwikkeld die nog steeds toegepast worden. Van veel van deze instrumenten is de principebeschrijving terug te vinden in het boek van Kurt Rantsch⁷, vooral de toepassing van optische componenten wordt daarin uitvoerig behandeld.

Een voorbeeld uit eigen laboratoria is de hier afgebeelde 2D-meetmachine. (Fig. 1). Opvallend is de plaatsing van de meetsystemen waarbij zo goed mogelijk aan het Abbe principe is voldaan.

In de opsomming van historische ontwikkelingen mag hier ook de instelling van grote standaarden-laboratoria niet vergeten worden.

De Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) werd in 1887 gesticht in Berlijn maar is na de tweede wereldoorlog vooral tot groei gekomen in Braunschweig. In Engeland ontstond het National Physical Laboratory (NPL) in 1900 en bevindt zich thans in Teddington bij Londen. Het misschien wel bekendste instituut was het NBS, te Gaithersburg later omgedoopt tot NIST (National Institute of Standards and Technology), (USA) gesticht in 1902.

In deze laboratoria werden standaarden ontwikkeld voor de erkende grootheden lengte, massa, tijd, stroom, temperatuur, hoeveelheid stof en lichtsterkte. Uiteraard was hier het streven een steeds hogere precisie te bereiken, wat de relatie tussen Metro-

logie en Precision Engineering duidelijker maakt.

Ook dient hier genoemd te worden de ontwikkeling van de bewerkingstechnologie. Het realiseren van produkten met hoge vormnauwkeurigheid en lage oppervlakteruwheid vraagt een speciale technologie en speciale machines.

Hoewel het duidelijk is dat hier een groot scala van bewerkingstechnieken wordt bedoeld springt één activiteit eruit: het bewerken met diamantgereedschap, speciaal het draaien en frezen. Het is niet geheel duidelijk wanneer dit gereedschap voor het eerst bij draaien werd gebruikt maar Tolansky⁸, bekend door zijn vele onderzoek op het gebied van de toepassing van de interferometrie, geeft aan dat dit al vroeg in de 19e eeuw was:

"In 1840 was het gebruik van diamant-snijgereedschap wel bekend doch nog weinig gebruikt. Men had ontdekt dat met gepolijst diamantgereedschap uitzonderlijk gladde, op spiegels gelijkende oppervlakken kunnen worden vervaardigd, zelfs bij zachte materialen als koper . . .".

Evans¹ geeft aan dat vooral bij Zeiss rond de eeuwwisseling diamant werd ingezet voor diverse soorten bewerkingen als draaien, boren, graveren. Na 1930 kwamen precisiedraaibanken op de markt, speciaal ingericht voor het precisie-bewerken van oppervlakken met diamant gereed-

schap. Rond 1940 had ook Philips een precisiedraaibank ontwikkeld voor het bewerken met diamant gereedschap.

Na de tweede wereldoorlog kwam er meer belangstelling voor de precisiebewerkingstechnieken. Hiervoor werden ultrapreciese machines gebouwd, waarbij vooral Lawrence Livermore National Laboratory (USA) een belangrijke rol vervulde. Onder leiding van Bryan werden diverse precisiebewerkingsmachines, vooral draaibanken, ontwikkeld waarin tal van concepten, tegenwoordig behorende tot de basis van het precisie-ontwerpen, waren verwerkt⁹.

In Cranfield (UK) is vooral onder leiding van McKeown een bekend instituut ontstaan (CUPE) dat de laatste tien jaar diverse typen grote precisiebewerkingsmachines heeft ontwikkeld¹⁰.

Ook in eigen land heeft vooral Philips, overigens meestal voor intern gebruik, diverse precisiefrees- en draaibanken ontwikkeld van zeer hoge kwaliteit en met zeer veel bewerkingsmogelijkheden. Vooral het produceren van spiegels en lenzen heeft hier de aandacht¹¹.

Naast Philips is op de commerciële markt Hembrug BV actief. Zij vervaardigen speciaal-machines voor precisiebewerkingen, vooral draaibanken. Behalve aan het draaien en frezen is de laatste jaren veel aandacht besteed aan het precisieslijpen. Op dit gebied, maar ook op de hiervoor genoemde gebieden, zijn de Japanners zeer actief.

Deze beknopte terugblik besluitend stel ik vast dat het vakgebied nog volop in beweging is en zich nog verder zal ontwikkelen, temeer daar de grenzen steeds verlegd zullen moeten worden. Stimulansen hiertoe kwamen, en komen, van wetenschappers als Erwin Loewen, Pat McKeown, Bob Donaldson, Jim Bryan en Bob Hocken. Zij bepaalden voor een belangrijk deel, het hedendaagse gezicht van het vakgebied Precision Engineering.

PRECISION ENGINEERING: EEN OVERZICHT VANUIT EEN TUE-VISIE

Een scherpe definitie van het vakgebied is in de literatuur niet te vinden. Iedere specialist bekijkt het vanuit zijn optiek en definieert het van daaruit. Duidelijk is wel dat het steeds gaat over de grenzen van de precisie en het verleggen ervan. Het vakgebied bewerkt thema's die men over een aantal jaren zal inpassen in de dan te realiseren bewerkings- en meetprocessen. Interessant is in dit verband het veel geciteerde schema van Taniguchi¹² waarin hij de ontwikkeling van de precisie aangeeft voor meet- en bewerkingsprocessen.

Het schema geeft aan dat we in deze tijd van het sub-micron naar het nanometergebied overgaan voor wat betreft de bewerkings- en meetgrenzen. Dit brengt met zich mee dat we in een stadium beland zijn waar we ons met vragen moeten gaan bezighouden

als: "wat is nog functioneel en wat zijn maten?"

Om tot een zekere afbakening te komen is door mij de volgende definitie van het vakgebied Precision Engineering opgesteld:

"Het ontwikkelen van methoden, concepten en apparatuur gericht op het bereiken van de hoogste precisie bij het meten, bewerken en positioneren van mechanische produkten".

Hierin ligt opgesloten de ontwikkeling van instrumenten en machines die tot het gestelde doel moeten leiden.

Dit is al zeer lang het kenmerk van het vakgebied: de machines en instrumenten waarmee de gewenste precisie gerealiseerd moet worden, bestaan of voldoen niet en moeten dus ontwikkeld of gemodificeerd worden.

Bij de ontwikkeling van precisie-apparatuur en het realiseren van precisie-produkten is steeds de integratie van een aantal vakdisciplines noodzakelijk. De belangrijkste zijn:

- mechanische metrologie, i.h.b. de geometrische aspecten,
- regel en besturingstechnologie,
- precisie constructieeler,
- precisie bewerkingstechnologie.

Deze activiteiten kunnen worden beschouwd als de pijlers van het vakgebied.

Er zij benadrukt dat het hier gaat om de technologie die nodig is om de con-

cepten voor machines en instrumenten te ontwikkelen en produkten te fabriceren. Bij de praktische realisatie zullen nog andere disciplines betrokken moeten worden.

De Metrologie wordt door velen gezien als de basis waaruit Precision Engineering is ontstaan. Zoals uit het historisch overzicht blijkt zijn meettechnische projecten meestal de basis geweest van waaruit de wetenschappers als Ramsden en zeker Michelson de instrumenten specificeerden en daarna, in eigen beheer, ontwikkelden.

Hieruit is ook het vakgebied van de **Geometrische Meettechniek** ontstaan waarin vooral universele meettechnieken, instrumenten en machines worden ontwikkeld die daarna op een breed gebied in onderzoek, ontwikkeling en productie worden ingezet.

De Geometrische Meettechniek richt zich met name op het meten van geometrie en oppervlaktestructuren.

Hoge precisie stelt bijzondere eisen aan de meetapparatuur waardoor hier opgaven voor de Precision Engineering liggen. De constructieve aspecten vragen bijzondere aandacht en de meest geavanceerde ontwikkelingen op dit gebied treft men dan ook aan in deze apparatuur.

De komst van de microcomputer heeft hier natuurlijk grote invloed gehad, omdat daarmee zowel de besturing als gegevensverwerking op een zeer hoog niveau kon worden gebracht. De laserinterferometer kon daarmee

optimaal worden bedreven en is nu zover ontwikkeld dat deze het belangrijkste kalibratie-instrument van de Geometrische Meettechniek is geworden. Kalibratie van meet- en produktiemachines zonder laserinterferometer is ondenkbaar; ook de laatste jaren worden nog steeds nieuwe kalibratietechnieken ontwikkeld waarbij de laserinterferometrie centraal staat¹³.

Ook de introductie van de computergestuurde (drie)-dimensionele meetmachines heeft grote veranderingen in het dimensionele meten teweeggebracht. De meetpunten worden hier vastgelegd in machinecoördinaten, daarna getransformeerd naar werkstukcoördinaten, waarna op deze coördinaatwaarden de benodigde berekeningen worden uitgevoerd om tot maten en uitspraken over goed- of afkeur te komen.

Twee zaken zijn hier van essentieel belang om tot hoge precisie te komen:

- de mechanische constructie met besturing moet zodanig functioneren dat uitgegeven coördinaatwaarden de werkelijke waarden zo dicht mogelijk benaderen;
- de in de software uitgevoerde berekeningen dienen zonder significante afwijkingen te worden doorgevoerd.

Het eerste punt heeft vooral betrekking op de nauwkeurigheid van de machine die bepaald wordt door een complex van factoren zoals:

- de kwaliteit van de geleidingen,
- de nauwkeurigheid van de meetsystemen,
- het gedrag van het aantaststelsel en de besturing, en
- het dynamisch en thermomechanisch gedrag van de constructie.

Het tweede punt vraagt om goede software, d.w.z. in alle gevallen voldoende nauwkeurige berekeningen. Praktische tests hebben uitgewezen dat dit lang niet altijd het geval is¹⁴.

De steeds hogere eisen ten aanzien van deze precisie, meestal gekoppeld aan (meet)-snelheid stellen zeer hoge eisen aan het ontwerp. In de ontwerp-fase zal hier moeten worden samengewerkt door verschillende specialisten als constructeurs, elektronici, optici en meet- en regeltechnici. De zogenaamde **mechatronische aanpak** is een "must"; de gestelde doelen zijn anders niet meer te realiseren.

Het spreekt voor zich dat bij precisiebewerkingsmachines de problematiek ten aanzien van de te bereiken precisie vergelijkbaar is. Ook zal men bij het ontwerp van precisie-apparaatuur steeds meer gebruik moeten gaan maken van sensoren, niet alleen voor de correctie van de temperatuursinvloeden, d.w.z. uitzetting en vervorming van machinedelen, maar ook voor de bewaking van het gedrag van de bewegende delen van machines via verplaatsings- en versnellingsopnemers. Met de verplaatsingsopnemers kunnen de relatieve bewegingen tussen sledes en geleidingen worden vastgelegd, terwijl met

versnellingsopnemers traagheidseffecten en trillingen kunnen worden bepaald. Rekstroken kunnen worden ingezet om de effecten van variërende en bewegende massa's te bepalen. Uiteraard kunnen een aantal van de hierboven genoemde effecten geminimaliseerd worden via optimale constructies of mechanische aanpassingen, maar steeds zal moeten worden afgewogen welke methode het meest doeltreffend en prijstechnisch gunstig is.

Ten aanzien van het **thermomechanisch gedrag** kan men constateren dat correctie vooral via temperatuursensoren zal verlopen. Hiertoe wordt de temperatuurverdeling in de machine met een aantal sensoren gemeten waarna de correcties worden berekend en toegepast. Tot nu gaat het vooral om lineaire uitzettingseffecten, zowel van de meetsystemen als het werkstuk. De effecten van de thermische vervorming van geleidingen

zijn nog onderwerp van studie, maar zullen in de nabije toekomst ook gecorrigeerd kunnen worden¹⁵. De hier aangegeven methoden voor het verbeteren van de nauwkeurigheid van machines en apparatuur vallen onder het concept "Softwarecorrectie".

Onder "**Softwarecorrectie**" wordt verstaan: het, met behulp van een gekoppelde computer, corrigeren van positie-afwijkingen die in een machine of instrument voorkomen.

Het concept is het eerst toegepast bij meetmachines waarbij de geometrie-afwijkingen als functie van de ruimtelijke posities worden vastgelegd, zodat bij het bereiken van deze posities in het machine-coördinatenstelsel correcties voor de afwijkingen kunnen worden doorgevoerd. (Fig. 2).

Softwarecorrectie richt zich op alle afwijkingen die bij het positioneren van

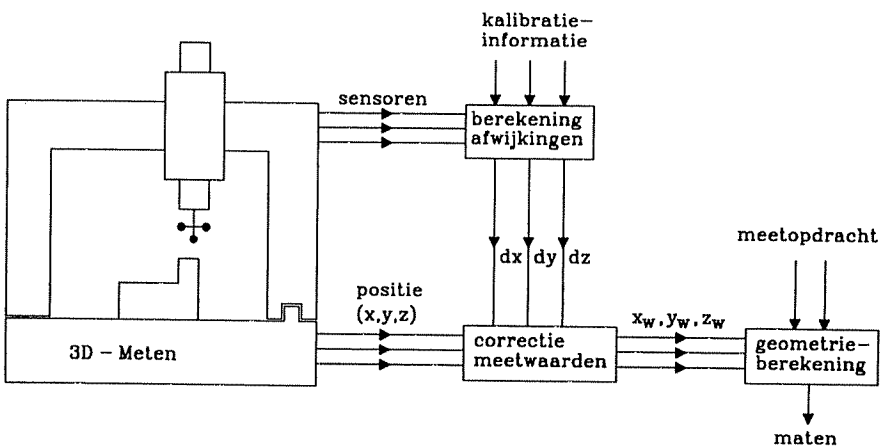


Fig. 2 Principe van softwarecorrectie.

de machine een rol spelen, dus behalve basisgeometrie-afwijkingen ook de afwijkingen die resulteren uit het thermomechanisch en dynamisch gedrag van de machine.

Er zij hier opgemerkt dat het concept "Softwarecorrectie" eist dat een machine reproduceerbaar positioneert. De precisie wordt daarna behaald via het correctiemechanisme, waarbij uiteraard de nauwkeurigheid waarmee de correcties zijn bepaald de effectiviteit van de correctie vastlegt.

Bij meetmachines kan de correctie meestal achteraf worden doorgevoerd, dus nadat de meetpunten zijn verzameld, bij bewerkingsmachines moet "online" worden gecorrigeerd.

Voor bij "online" correctie zullen hoge eisen gesteld moeten worden aan de computerondersteuning. De correctie moet hier tijdens het positioneren worden aangebracht zodat metingen en berekeningen voor het bepalen van de correctie tevoren moeten zijn uitgevoerd. Bij continue bewerkingsprocessen moet daarnaast de correctie zo worden doorgevoerd dat de oppervlaktegesteldheid aan de eisen blijft voldoen.

Er zij hier opgemerkt dat rotaties van het gereedschap, resulterende uit vormafwijkingen in de geleidingen, alleen te corrigeren zijn via actuatoren in de gereedschapsopname of door rotatie van het werkstuk. Dit alles vereist een "intelligente" softwarecorrectie waarbij meten, berekenen en corrigeren zoveel mogelijk parallel moeten worden uitgevoerd, hetgeende gewenste computerondersteuning vastlegt.

Behalve voor precisiebewerkingsmachines kan deze techniek ook voor positioneringsapparatuur als bijvoorbeeld wafersteppers worden ingezet. Hier dient de wafer, een plak silicium met een diameter van 150 mm, in twee richtingen gepositioneerd te worden met een onnauwkeurigheid van 0,1 μm . Het bovenzak, waarop de "chip" moet worden aangebracht, dient binnen 50 nm van de gewenste positie te zijn tijdens de belichting.

Deze extreme eisen zijn eigenlijk alleen nog te realiseren met positioneren via meten en besturen. Diverse sensoren meten de parameters waarna via softwarecorrectie en besturing de juiste posities worden ingesteld. Daar vooral in dit vakgebied, de chipproductie, de eisen haast elk jaar worden opgeschroefd ligt hier een zeer interessant gebied van activiteiten.

Hier is de precisie-mechatronica zeer ver ontwikkeld: de toepassing van sensoren, meetsystemen en (lineaire) motoren is volledig in het ontwerp geïntegreerd. Ook het gebruik van verschillende materialen om het thermomechanisch gedrag te beheersen is hier ver gevorderd.

Bij precisiebewerkingsprocessen, vooral de verspanende, speelt naast de vormnauwkeurigheid ook de oppervlaktekwaliteit van het produkt een grote rol. Deze stellen zeer hoge eisen aan de positioneringsnauwkeurigheid van de machine, de kwaliteit van het gereedschap en het bewerkingsproces. Het gereedschap moet hier steeds gezien worden in relatie tot het

materiaal dat dient te worden bewerkt. Het is bekend dat lang niet alle materialen met hetzelfde gereedschap zijn te bewerken. Een voorbeeld is hier diamant, geschikt voor het bewerken van materialen als koper, nikkel en aluminium maar ongeschikt om onder "normale" condities staal te bewerken. Bij zorgvuldige analyses blijkt echter ook de bewerking van koper en aluminium verschillende slijtagebeelden van het diamantgereedschap op te leveren, terwijl het onder speciale condities mogelijk blijkt toch roestvast staal te bewerken.

Deze voorbeelden geven aan dat het gebied van de precisiebewerkingsprocessen niet uitontwikkeld is, iets wat ook moge blijken uit het aantal publicaties dat hierover jaarlijks verschijnt¹⁶.

Tenslotte een wat minder bekend deel van het vakgebied dat zich richt op de kwaliteitsbeheersing in de productie, vooral het technische deel ervan. De kwaliteitsbeheersing in een bedrijf heeft vooral organisatorische kanten waardoor de technische aspecten dikwijls wat onder de oppervlakte blijven.

Bij de implementatie van zo'n systeem, door alle geledingen van het bedrijf, blijken de technische aspecten tot veel problemen te leiden.

In een productiebedrijf van mechanische producten betekent dit bijvoorbeeld dat de kwaliteit van meet- en produktiemiddelen aantoonbaar beheerst moet zijn. Hiervoor moeten de specificaties van deze middelen zijn

vastgelegd en moeten procedures en methoden worden ontwikkeld om de specificaties te toetsen. Het gaat hier vooral om kalibratietechnieken voor meetmiddelen en machines, die bij het productieproces worden ingezet. Vooral de laatste jaren, mede onder invloed van de ISO-9000 richtlijnen, is de behoefte aan deze technieken, vooral uit de industrie, enorm toegenomen.

Frappant is dat in West-Europa het gebruik en de toetsing van de kalibratietechnieken zeer snel is verbreid, zelfs sneller dan in de rest van de wereld. Dit is mede te danken aan de West European Calibration Cooperation (WECC) die de kalibratie-activiteiten in een groot aantal Westeuropese landen op elkaar afstemt en onderling toetsingen uitvoert.

Het laboratorium voor Geometrische Meettechniek, thans onderdeel van de leerstoel Precision Engineering, heeft hierin in samenwerking met de Nederlandse Kalibratie Organisatie (NKO) vanaf het begin in 1983 een belangrijke rol gespeeld.

De rol ligt vooral in de ontwikkeling van meettechnieken en procedures en de deelname aan audits en werkgroepen, zowel nationaal als internationaal.

Dames en Heren,

Na enig gewroet in de historie is hier een overzicht gegeven van de activiteiten die in het vakgebied Precision Engineering voorkomen.

We hebben vastgesteld dat de Geometrische Meettechniek, met ondersteunende fysische meettechnieken als temperatuurmeting en interferometrie, een belangrijke rol speelt in dit vakgebied.

Daarnaast is een hoog niveau van constructief denken vereist om de gewenste concepten en apparatuur te kunnen ontwikkelen. Hierbij dient men systematisch te werk te gaan volgens ontwerppatronen die hiervoor in het vakgebied zijn ontwikkeld. Vooral het thermomechanisch en dynamisch gedrag van de apparatuur dient voldoende aandacht te krijgen. Dit vraagt om modelbeschouwingen en simulatie alvorens tot realisatie van prototypen kan worden overgegaan.

Ook dient de mechatronische benadering de volle aandacht te krijgen; alleen dan zullen alle mogelijkheden om te komen tot hoogwaardige apparatuur worden benut.

Hierbij speelt ook de regel- en besturingstechnologie een belangrijke rol: aan een aanzienlijk deel van de eisen kan alleen worden voldaan met behulp van geavanceerde regel- en besturingstechnieken.

Ook op het gebied van de precisie-bewerkingstechnologie is nog veel werk te doen.

Vooral het bewerken van "moeilijke" materialen, zoals glas en staal, staat

hier in de belangstelling. Ook kan de absolute precisie van de machines nog verbeterd worden met name via actieve compensatie van het thermomechanisch en dynamisch gedrag van deze machines.

PRECISION ENGINEERING: UNIVERSITAIR ONDERZOEK

Uitgaande van het hiervoor beschreven vakgebied zal nu verder worden ingegaan op onderzoek zoals dat in onze universitaire omgeving kan worden verricht.

De, vooral financiële, randvoorwaarden nopen tot beperkingen van vrijheid van onderzoekskeuze waardoor deze keuze moet worden afgestemd op projecten die ook interessant zijn voor externe geldgevers.

De onderzoekopzet kan dan ook niet anders dan gemengd zijn: eigen onderzoek met zeer gelimiteerde middelen én gesubsidieerd onderzoek door overheid, EEG en bedrijfsleven.

Ons onderzoek is reeds langere tijd gebaseerd op deze opzet, mede omdat het vakgebied vraagt om kostbare machines en meetapparatuur om naast de modelvorming en theoretische beschrijvingen experimentele studies en verificaties te kunnen uitvoeren. Dit is een absolute noodzaak voor een vakgebied dat zich begeeft op de grenzen van wat mogelijk is. Een aantal belangrijke onderzoeksthema's zal hierna nader worden toegelicht.

Standaarden en Kalibratie

Al sedert lange tijd wordt in ons laboratorium onderzoek gewijd aan de ontwikkeling van standaarden voor het nauwkeurig meten van lengte en hoeken. Voor dit doel worden methoden en apparatuur ontwikkeld waarmee het mogelijk is aan de hoogste nationale en internationale eisen te voldoen. Op dit gebied wordt nauw samengewerkt tussen diverse nationale standaarden - instituten.

In dit traject is de praktische Nederlandse lengtestandaard ontwikkeld zoals deze thans in ons laboratorium en bij het Nederlandse standaarden-instituut, het NMI, in gebruik is (Fig.3). In beginsel is dit een volledig Eindhov-

vense ontwikkeling die van groot belang is geworden voor de Nederlandse industrie.

Dit onderzoek houdt direct verband met de ontwikkeling van commerciële laserinterferometers die thans vooral in gebruik zijn als kalibratie-instrument voor meetapparatuur en bewerkingsmachines. Door de toenemende vraag naar kwaliteitsbeheersing worden deze instrumenten steeds meer in de industrie ingezet.

Kalibratie van de laserinterferometer is vanwege de herleidbaarheidseis naar standaarden een noodzaak. De lengtestandaard speelt daarbij een belangrijke rol, immers men kan de

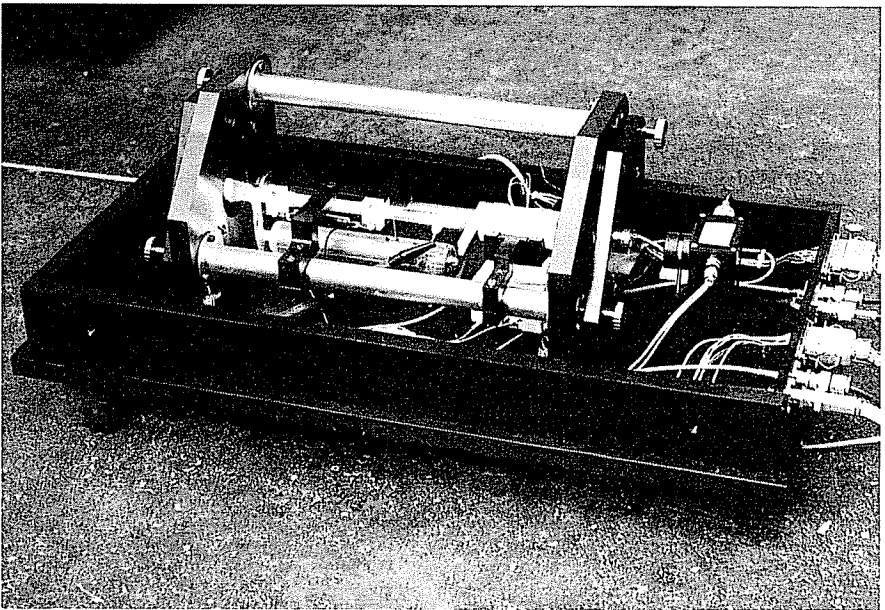


Fig. 3 De praktische Nederlandse lengtestandaard. Het ${}^3\text{H}_e - {}^{20}\text{N}_e - {}^{127}\text{J}_2$ lasersysteem.

laserlichtbron van deze interferometer direct vergelijken met de lengtestandaard. Van groot belang voor het juist functioneren van de laserinterferometer is daarnaast de juiste bepaling van de brekingsindex van lucht die de golflengte in lucht vastlegt. Ook voor de meting van de brekingsindex zijn meetconcepten ontwikkeld waarmee apparatuur is gebouwd die elders uitvoerig is beschreven¹⁷. Deze "interferentierefractometer" laat toe de absolute brekingsindexwaarde van lucht te bepalen, inclusief optredende luchtverontreiniging. Bij commercieel verkrijgbare laserinterferometers wordt hoofdzakelijk gebruik gemaakt van sensoren waarmee de grootheden, die de brekingsindex van lucht bepalen, worden gemeten. Het functioneren van deze apparatuur kan met de interferentierefractometer worden gecontroleerd.

Daar commerciële laserinterferometers tegenwoordig geschikt zijn voor het nauwkeurig meten van kleine hoeken en rechte hoeken van objecten, richt een deel van het onderzoek zich thans op de ontwikkeling van kalibratie-apparatuur voor deze grootheden.

Bij de hier beschreven ontwikkelingen gaat het om apparatuur waaraan extreme eisen worden gesteld vooral ten aanzien van positioneringsnauwkeurigheid en het thermomechanisch gedrag. "Design for Precision" speelt hier een zeer belangrijke rol.

Metten van vorm en ruwheid

De laatste jaren is veel aandacht gericht geweest op de ontwikkeling van

methoden en instrumenten voor het bepalen van de vorm en ruwheidsstructuur van produkten. Door de opkomst van krachtige, goedkope computersystemen kunnen de grote aantallen gegevens die bij deze metingen ontstaan, "online" worden vastgelegd en verwerkt worden tot meetresultaten.

Een groot deel van de vormmetingen wordt uitgevoerd met coördinatenmeetmachines, vooral driedimensionale, die ook steeds meer in de industriële omgeving worden toegepast.

Door het commerciële belang vindt de ontwikkeling van deze machines vooral in de industrie plaats, de universitaire laboratoria houden zich met deelproblemen bezig.

In ons laboratorium richt het onderzoek zich op de ontwikkeling van belangrijke componenten als lucht-lagers en tastsystemen. Daarnaast wordt veel aandacht besteed aan de verbetering van de nauwkeurigheid van deze apparatuur via de ontwikkeling van kalibratiemethoden en softwarecorrectie. Bij de verbetering van de nauwkeurigheid van deze machines richt de aandacht zich niet alleen op de "hardware" maar ook op de programma's die gebruikt worden voor de, dikwijls ingewikkelde, berekeningen die nodig zijn om de gewenste meetresultaten te berekenen.

Dat deze programmatuur getoetst dient te worden op het juist functioneren moge blijken uit resultaten van een vergelijkend Europees onderzoek waaruit blijkt dat vrijwel geen enkel pakket, toegepast op coördinaten-

meetmachines, voldoet aan alle eisen¹⁴. Het lijkt overigens zinvol deze toetsingen niet alleen voor meetmachine-programmatuur uit te voeren doch ze ook uit te breiden naar de programmatuur, toegepast bij moderne bewerkingsmachines.

Het vastleggen van de ruwheidsstructuur van oppervlakken is één van de klassiekers in de mechanische meettechniek. Naast de standaardtechniek, waarbij een scherpe naald over een oppervlak wordt bewogen en waarbij de naaldbeweging loodrecht op het oppervlak wordt gemeten, worden ook steeds meer optische technieken gebruikt om de structuur van het oppervlak vast te leggen.

Bij de contactloze meettechnieken zijn de interferometrische en "optische naald"-technieken populair. Als optische naald wordt een opnemer gebruikt die ook in CD-spelers wordt toegepast. De laatste jaren is in ons laboratorium veel onderzoek verricht naar de toepassing van de CD-opnemer voor ruwheidsmeting, vooral in die gevallen waarbij andere technieken moeilijk zijn toe te passen, zoals bij zachte materialen, en het meten van de ruwheid van afdichtingen onder bedrijfscondities.

Een interessante ontwikkeling is hier ook de komst van de "Scanning Probe" - meettechnieken. Hierbij wordt een scherpe naald op korte afstand langs het oppervlak getrokken waarbij de stroom tussen de naaldpunt en het oppervlak (STM) of de attractiekrachten tussen deze (AFM) als instelcrite-

rium dienen. Met deze technieken is het mogelijk oppervlakteverstoreningen kleiner dan 1 nm te registreren. (Fig. 4)

Onze aandacht richt zich hier op de toepassing voor precisie-ruwheidsmeting waarbij over grotere oppervlakken moet worden gemeten dan tot nu toe mogelijk is. Deze toepassing stelt extreme eisen aan de constructieve opbouw van de apparatuur. Belangrijk is hier ook de ontwikkeling van specifieke programmatuur waarmee uit de grote aantallen meetwaarden de juiste ruwheidsparameters kunnen worden berekend.

Constructieve aspecten

Uit het voorgaande is het duidelijk geworden dat in het vakgebied Precision Engineering analyse en toepassing verbonden zijn. De ontwikkeling van slimme machines en instrumenten is een essentieel onderdeel van het vakgebied. Dit houdt in dat alle elementen die de kwaliteit van de constructie bepalen hier aan de orde komen. Het construeren op positienauwkeurigheid houdt in dat het statisch, dynamisch en thermomechanisch gedrag van het ontwerp bekend is alvorens het gerealiseerd wordt. De benodigde kennis zal, voorzover deze niet voorhanden is, ontwikkeld moeten worden. Het onderzoek in de groep richt zich hier in eerste instantie op constructieve concepten zoals wrijvingswielaandrijvingen en luchtgelagerde systemen daar hiervan expertise aanwezig was, terwijl daarnaast de ontwikkeling van precisie-aantastsystemen en de

verbetering van het dynamisch gedrag van precisiemachines aandacht krijgt.

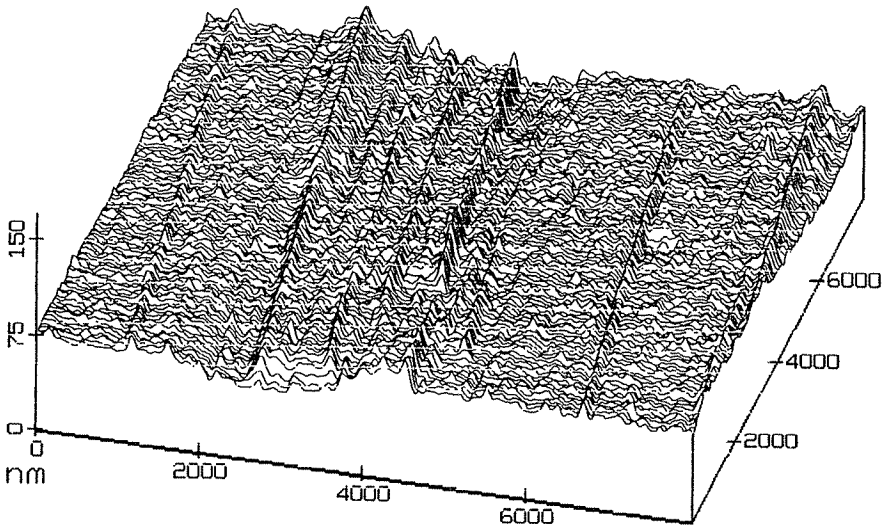
Bij de studie van de luchtgelagerde systemen ligt de nadruk op toepassingen in precisiemachines. Hier richt de aandacht zich op hoge stijfheid en stabiliteit waarbij ook de constructieve aspecten en de invloed van oppervlaktegesteldheid worden geanalyseerd.

Ook wordt aandacht besteed aan de opbouw van efficiënte rekenprogramma's om de juiste luchtlagervorm te kunnen berekenen. Het is nu mogelijk de drukverdeling onder luchtlagers

voor diverse uitvoeringsvormen numeriek te bepalen evenals de daarbij behorende draagkracht en stijfheid. Ook zijn ontwerpregels voor stabiliteit ontwikkeld¹⁸.

Andere invloedsfactoren voor het functioneren van precisieluchtlagers zijn de oppervlakteruwheid en kanteling ten opzichte van het referentievlak. Deze zijn onderwerp van een lopende studie, waarbij ook het gedrag van luchtgelagerde systemen wordt bestudeerd.

Bij het nauwkeurig positioneren van sledes speelt het aandrijfsysteem met



NiP

Fig. 4 STM-registratie van een NiP oppervlak, waarop het slijtagebeeld van het diamant gereedschap afgebeeld is.

Opname: Hr. J. Oomen, Philips Natuurkundig Laboratorium.

besturing een belangrijke rol. Wrijvingswiel aandrijvingen zijn in dit verband zeer interessant daar zij theoretisch een zeer gunstig spelings- en hysteresegedrag vertonen. De praktische limieten zijn echter niet bekend, zodat ook dit een onderzoekthema is.

In het kader van de precisie-mechatronica is de toepassing van piezo-elektrische materialen zeer interessant. Geschikte uitvoeringsvormen laten toe subnanometer en nanometerverplaatsingen te genereren die men via slimme constructies kan koppelen tot grotere translaties en rotaties. Uitgerust met de juiste positiedetectoren kan hiermee een nieuwe generatie aandrijf- en positioneringssystemen worden opgebouwd.

Softwarecorrectie

Een zeer succesvolle onderzoekslijn van de laatste tijd is de, via programmeur aangebrachte, verbetering van de meet- of positioneringsnauwkeurigheid van precisiemachines. Hierbij worden de machine-afwijkingen, die leiden tot een afwijking op de gereedschapspositie of tasterpositie bij meetmachines, gecorrigeerd via correcties op de ingestelde positie. Essentieel is hier dat de machine-afwijkingen nauwkeurig zijn vastgelegd en op de juiste wijze "vertaald" worden naar de ingestelde positie. Twee aspecten zijn hierbij bepalend:

- zeer nauwkeurige meettechnieken om de afwijkingen vast te leggen, en
- slimme rekentechnieken om tot een

nauwkeurige bepaling van de correcties te komen.

De laatste jaren is veel onderzoek gericht geweest op het nauwkeurig vastleggen van de afwijkingen van de machines. Er zijn goede meettechnieken ontwikkeld om de geometrische en thermomechanische afwijkingen te bepalen. Een extra probleem hierbij is dat de thermomechanische afwijkingen afhangen van de temperatuurverdeling in de machine, waardoor, vooral bij bewerkingsmachines met hun interne warmtebronnen, deze afwijkingen lastig te beschrijven zijn. Het onderzoek bestaat uit twee delen: het ene deel richt zich op de experimenteel-statistische bepaling van de ontstane afwijkingen, terwijl bij het andere deel uitgegaan wordt van een modelbeschrijving van waaruit met de gemeten temperatuurverdeling de afwijkingen worden berekend. De eerste resultaten tonen aan dat in beide gevallen een aanzienlijke verbetering van de positioneringsnauwkeurigheid kan worden bereikt 15. (Fig. 5)

Er zij opgemerkt dat het hier gaat om de correctie van instationaire afwijkingen die zijn bepaald via de experimenteel-statistische methode.

Ook voor meetmachines is een softwarecorrectie voor geometrie en thermomechanische afwijkingen ontwikkeld. Hier worden nu grenzen bereikt omdat de meetnauwkeurigheid bij het bepalen van de afwijkingen een limiterende factor wordt. Nieuwe, directe, meetmethoden zijn hier in ontwikke-

ling waardoor naar verwachting de meetnauwkeurigheid aanzienlijk kan worden verbeterd¹⁹.

Interessant voor softwarecorrectie zijn ook de afwijkingen die ontstaan door het dynamisch gedrag van machines. Hierbij zal veel aandacht gewijd zijn aan de regel- en besturings-technische problemen die daarbij dienen te worden opgelost.

Voor het meten op bewerkingsmachines worden nieuwe concepten ontwikkeld waarbij uitgegaan wordt van een bewerkingsgang en meetgang ieder met hun eigen specifieke softwarecorrectie. Het moet hierbij mogelijk worden interproces-informatie over

de nauwkeurigheid van de bewerking te verzamelen die dan in een volgende bewerkingsgang kan worden gebruikt voor verhoging van de precisie van de bewerking (Fig. 6). Correctie voor slijtage en afwijkingen bij instellen van het gereedschap kan hierin worden meegenomen.

Precisiebewerken

Zoals reeds is aangegeven is al het nodige onderzoek, gericht op de proceskant van het precisiebewerken, in de vakgroep uitgevoerd. Met name is hier aandacht besteed aan de nauwkeurigheid van het draaien met diamantgereedschap²⁰. Hierbij is kennis

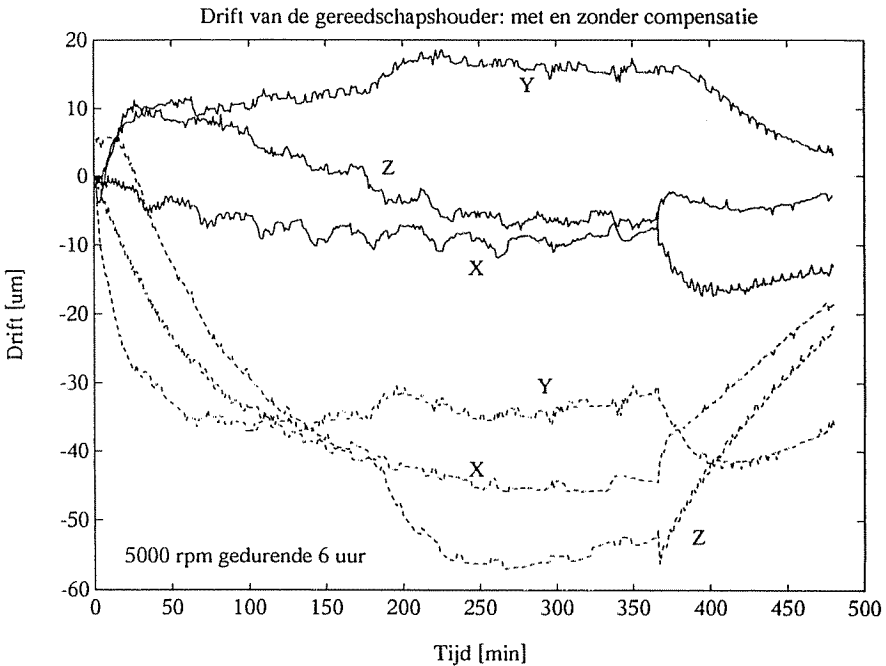


Fig. 5 Een resultaat van een correctie van thermomechanische afwijkingen.

ontwikkeld van dit bewerkingsproces en de machinefactoren die dit beïnvloeden. Daarnaast is op andere plaatsen, zoals bij de Centrale Technische Dienst van de TUE, veel ervaring opgedaan met de constructie en bouw van deze bewerkingsmachines. Vanuit deze kennisconcentraties kunnen nieuwe activiteiten worden gestart om ook het onderzoek op het bewerkingsdeel van Precision Engineering gestalte te geven. Van groot belang hierbij is de ondersteuning door de Nederlandse industrie, daar met name dit deel van het onderzoek relatief kostbaar is.

In een later stadium kan de aandacht hier ook op andere activiteiten worden gericht, waarbij de niet verspanende precisiebewerkingen een interessante richting zijn.

ONDERWIJS IN PRECISION ENGINEERING

Het multidisciplinaire karakter van het vakgebied vraagt om een brede opleiding die binnen het huidige kader moeilijk is te realiseren. Hier kan een structuur van basisvakken worden gerealiseerd, die verplicht zijn voor de vakstudent, daarnaast kan een gericht pakket van vakken worden aangeboden waaruit een keuze kan worden gemaakt.

In de basisvakken moeten de belangrijkste aspecten van het vakgebied opgesloten liggen:

- Geavanceerde fysische en mechanische Metrologie.

Basiselementen zijn hier dimensionele meettechniek, vorm- en ruwheidsmeting en interferometrische meettechnieken. In een kort bestek zullen ook de belangrijkste sensorprincipes en bijbehorende meet-

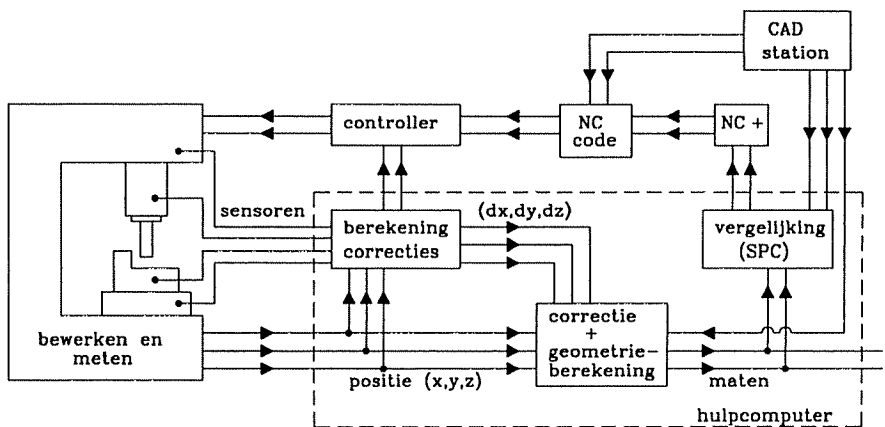


Fig. 6 Meten en produceren op bewerkingsmachines. Een schematische opzet.

technieken moeten worden behandeld.

Aandacht moet hier ook worden besteed aan modelbeschrijving van geometrische en thermomechanische afwijkingen bij machines en instrumenten.

- **Constructieve aspecten.**
De aandacht is hier gericht op de realisatie van ontwerpen voor gebruik in dit vakgebied. Daartoe behoort een vak "Constructieprincipes" gericht op het bereiken van hoge positioneringsnauwkeurigheid inclusief het voorstellen van het dynamisch gedrag van constructies, instrumenten en machines. Ook dient het beschrijven van het thermomechanisch gedrag aandacht te krijgen evenals de keuze van materialen voor precisiedoelinden en het maken van afwijkingenanalyses ("error budgeting"). Verder verdient het aanbeveling een deel "Precisiemechanica" op te nemen waarin het belang van een mechatronische aanpak nader wordt toegelicht.
- **Regel- en besturingstechnologie.**
Dit deel dient zich te richten op de specifieke eisen en toepassingen van het vakgebied. Hierbij kan worden uitgegaan van het uitgebreid basispakket "Regeltechniek" dat reeds in de faculteit aanwezig is.
- **Precisiebewerkingstechnologie.**
Hier moeten zowel de proces- als de machine-aspecten aan de orde komen. De diverse technieken geschikt voor het precisiebewerken dienen besproken te worden zoals

draaien met diamantgereedschap, slijpen, polijsten, laserbewerken, etc.

Naast deze processen dient ook voldoende aandacht te worden besteed aan de realisatie van de dikwijls zeer specifieke machines die voor deze bewerkingen vereist zijn.

In het keuzegedeelte moet voldoende ruimte zijn ingericht voor het uitbreiden van de specifieke kennis voor het vakgebied met vakken als optica, laserfysica en elektronica met name de toepassing van sensoren en actuatoren.

De researchervaring tenslotte moet worden opgedaan via onderzoekopdrachten en de eindstudie. Hier moeten mogelijkheden worden gecreëerd om de studenten te laten werken in industriële en universiteitslaboratoria in binnen- en buitenland. Een goede basis hiervoor is samenwerking in internationale onderzoekprogramma's.

Tot besluit

Mijnheer de Rector Magnificus,
Dames en Heren,

Hiermee kom ik aan het laatste deel van deze rede waarin ik u heb meeegenomen op een korte reis door mijn vakgebied. In het historisch perspectief heb ik u het ontstaan geschilderd van het vakgebied en u voorgesteld aan beroemde vakgenoten. De beschrijving van het vakgebied gaf u

inzicht in de belangrijkste heden-
daagse activiteiten in de wereld en de
huidige stand van de techniek. Kort
ben ik daarna ingegaan op belangrijke
onderzoeksgebieden waarbij ik ook
onze eigen onderzoekinspanningen
heb aangegeven. Tot slot heb ik mijn
visie op het onderwijs voor dit vakge-
bied gegeven en het zal u niet verba-
zen dat deze gedeeltelijk al terug te
vinden is in het huidige onderwijspro-
gramma en in het deel dat ik verder
nog hoop te realiseren in de nabije
toekomst.

Tenslotte hier enige woorden van
dank.

Als eerste dank ik het College van Be-
stuur van onze universiteit voor mijn
benoeming tot hoogleraar Precision
Engineering.

Daarnaast dank ik het Dagelijks Be-
stuur van de Faculteit Werktuigbouw-
kunde die mij heeft voorgedragen
voor deze benoeming.

Hooggeleerde Van der Wolf,
Beste Toon,

Bijna zeven jaar vonden mijn groep
Geometrische Meettechniek en ik
steun en bescherming bij je leerstoel
Produktiemiddelen. Je liet me als UD
en later als UHD vrij die dingen te doen
die we goed vonden voor ons vak. Dit
heeft ons geen windeieren gelegd!
Nu we als collega's functioneren blijkt
dit onze goede samenwerking niet in
de weg te staan. Het is mijn nadrukke-

lijke wens dat dit in de toekomst zo
blijft.

Hooggeleerde Kals,
Beste Jo,

Hoewel we zelden een formele sa-
menwerking hebben gehad, hebben
we wel altijd samengewerkt, niet al-
leen op allerlei bestuurlijke niveaus
maar ook via onze vakgebieden. Ik
ben er van overtuigd, dat deze samen-
werking zal blijven voortduren.
Daarnaast heb ik je leren kennen als
een collega die oog heeft voor de goe-
de dingen van het leven. Ik hoop ook
daar nog veel van je te leren.

Hooggeleerde Rooda,
Beste Koos,

Onze vakgebieden zijn niet zeer ver-
weven, toch is onze samenwerking
zeer hecht.

Al jaren vormen we een team dat de
vkgroep leidt, ook in het laatste woe-
lige jaar van herstructurering en her-
indelingen. Je leerde me hoe je effi-
ciënt en doelmatig de vkgroep kunt
besturen zodat er nog tijd voor eigen
werk overblijft. Verder was je als vak-
groepvoorzitter een formidabele
steun in voor mij persoonlijk moeilijke
momenten.

Ik hoop en vertrouw op een verdere
vruchtbare samenwerking.

Hooggeleerde WOC-collega's,

Door het vakgroepoverschrijdende
karakter van deze leerstoel kregen wij

met elkaar te maken in projecten en vakgroepsbestuur. Deze contacten heb ik als zeer positief ervaren en ik hoop dat dit ook voor u geldt. Ik stel u voor op deze basis verder te gaan en samen te werken aan de verdere verbetering van onderwijs en onderzoek in onze faculteit.

Dames en Heren medewerkers,

De sectie Precision Engineering heeft een spannende tijd achter de rug waarin we aan elkaar moesten wennen en met elkaar leren werken. Vooral voor mijn nieuwe medewerkers was dit een hele overgang. Toch heeft u mij loyaal steun gegeven bij de opbouw van de leerstoel waaraan we nu werken. Dit heeft de afgelopen tijd al veel van ons gevraagd bij de inrichting van nieuwe stukken onderwijs en verbetering van laboratoriumfaciliteiten. Daarnaast is hard gewerkt in de diverse onderzoeksprojecten. Ik dank u voor uw steun en inzet en hoop ook in de toekomst op u te kunnen rekenen.

Dames en Heren studenten,

Meer nog dan in het verleden zult u met mij te maken krijgen. Nu niet meer alleen als docent maar ook nog als afstudeerhoogleraar. Samen moeten we zorgen voor de kwaliteit in uw opleiding, dit is ons gezamenlijk belang. Ik zal van u inzet vragen, ook van mij en mijn sectie mag u die verwachten bij uw eerste, soms nog wat wankele, schreden op het pad naar de goede Precision Engineering-ingenieur.

Lieve Jenny en Lonneke,

Jullie zijn mijn volwassen dochters, studerend aan universiteit en hogeschool en vol toekomstverwachtingen.

Bij de weekend-bezoeken geniet ik van de verhalen over het leven, studie, stage-ervaringen en plannen voor de eindstudie.

Van jullie leer ik met beide benen op de grond te blijven staan en het leven te relativeren. Het is bijzonder bij jullie te mogen zijn.

Lieve Marianne,

Mijn laatste woord richt ik tot jou als mijn vrouw en rustpunt in mijn vaak woelige leven. Steeds heb je me gesteund, bij jarenlange avondstudies, het schrijven van een dissertatie en nog duizenden andere zaken.

Vooral aan jou heb ik het te danken dat ik hier sta, daarom sta ik hier ook voor jou.

Dames en Heren,

Ik dank u voor uw aandacht.

Geraadpleegde literatuur

1. Evans C. "Precision Engineering: an Evolutionary View"
Cranfield Press, Bedford UK 1989.
2. Mumford L. "Technics and Civilization"
Harcourt and Brace, New York 1934.
3. McKeown P. "Why precision?"
Precision Engineering, 1, no 2, 1979.
4. Willis R. "Principles of Mechanism"
London 1870, 2nd edition.
5. Michelson A.A. "Studies in Optics"
The University of Chicago Press, 1927, Chicago.
6. Engelhardt E. "Über die neue Definition des Meters auf Grund einer Lichtwellenlänge"
Zeitschr. für Angew.Phys. 13, 1961.
7. Räntsch K. "Die Optik in der Feinmesztechnik"
Carl Hanser Verlag, München, 1949.
8. Tolansky S. "The history and use of diamond"
Methnen and Co, London, 1962.
9. Bryan J.B. "Design and construction of an ultra precision 84 inch diamond turning machine."
Precision Engineering 1, no 1, 1979.
10. Mc Keown P. "Some aspects of the design and development of a large high precision CNC diamond turning machine".
CIRP ANNALS, Vol 31/1, 1982.
11. Gysbers T.C. "Colath, a numerically controlled lathe for high precision."
Philips Techn.Rev. 39, 1980.
12. Taniguchi N. "Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing"
Annals of the CIRP, Vol. 32/2, 1983.

13. Schellekens P. "Laserinterferometrie"
MB-Produktietechniek 57, no 5, mei 1991.
14. Diverse auteurs Eur 10909 EN, Eur 13417 EN, Eur 13418 EN.
Testing coordinate measuring machine algorithms.
BCR-rapporten. Uitgave: Commission of the European Communities
Brussel, 1986, 1991.
15. Theuws F.C. "Enhancement of machine tool accuracy: theory and
implementation"
Proefschrift TUE, 1991.
16. Proceedings of ASPE Annual Meetings, USA.
Proceedings of International Precision Engineering Seminars,
West - Europe (2 jaarlijks)
Precision Engineering, Journal of ASPE.
17. Schellekens P. "Absolute meetnauwkeurigheid van technische laser-
interferometers"
Proefschrift TUE, 1986.
18. Wang J.M. Proefschrift TUE, 1992 (in voorbereiding)
19. Soons J., Theuws F., Schellekens P. "Modelling the errors of multi-axis
machines: a general methodology"
Precision Engineering 14, no 1, 1992.
20. Lo A Foe G. "Single point diamond turning"
Proefschrift TUE, 1988.

Vormgeving en druk:
Reproductie en Fotografie van de CTD
Technische Universiteit Eindhoven

Informatie:
Academische en Protocolaire Zaken
Telefoon (040-47)2250/4676



Pieter Schellekens werd in 1941 te Best geboren. Na het behalen van het diploma Instrumentmaker aan de Philips' Jongens Nijverheids Opleiding te Eindhoven in 1959, werd hij technisch medewerker bij het Philips Natuurkundig Laboratorium te Eindhoven. In 1964 werd hij aangesteld als medewerker technisch onderwijs bij de faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven. Daarnaast behaalde hij de akte N1, leraar Wis- en Natuurkunde, in 1967 en het diploma HTS - Natuurkunde in 1972. Hij werd in 1967 aangesteld als technisch ambtenaar bij de groep Geometrische Meettechniek van de faculteit Werktuigbouwkunde. Hiernaast studeerde hij aan de faculteit Technische Natuurkunde waar hij in 1978 het ingenieursdiploma ontving.

In 1986 promoveerde hij aan de Technische Universiteit Eindhoven op het onderwerp "Absolute meetnauwkeurigheid van technische laserinterferometers".

Sedert 1978 is hij docent Werktuigkundige Meettechniek aan de Hogeschool Eindhoven.

Hij leidde de groep Geometrische Meettechniek vanaf 1984, eerst als Universitair Docent en sedert 1987 als Universitair hoofddocent. Van 1983 tot 1991 was hij voorzitter van de Technische Commissie GM van de Nederlandse Kalibratie Organisatie.

Hij is auteur en mede-auteur van een aanzienlijk aantal publicaties en is sedert 1985 corresponding member of CIRP.

Per 1 mei 1991 is hij benoemd tot hoogleraar aan de Technische Universiteit met als leeropdracht Precision Engineering.