

Precision engineering : een balans en de toekomst

Citation for published version (APA):

Schellekens, P. H. J. (2004). *Precision engineering : een balans en de toekomst*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2004

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.

AQA
2004
SCH

U/e

technische universiteit eindhoven

Afscheidsrede
3 december 2004

prof.dr.ir. P.H.J. Schellekens



precision engineering:

een balans en de toekomst

/ faculteit werktuigbouwkunde

Afscheidsrede

Uitgesproken op 3 december 2004
aan de Technische Universiteit Eindhoven

precision engineering:

een balans en de toekomst

prof.dr.ir. P.H.J. Schellekens

Inleiding

Mijnheer de Rector Magnificus, Dames en Heren,

Deze afscheidsrede gaat over 13 jaar Precision Engineering in de faculteit Werktuigbouwkunde, vanaf begin 1991 tot medio 2004. Mijn intrede in 1992 gaf na een korte historische introductie een overzicht van de stand van zaken in het vakgebied Precision Engineering. De structuur van het vakgebied, zoals toen al aangegeven, is opgebouwd rond drie functionele basiselementen: dimensionele metrologie, ontwerpen en realiseren van precisie-apparatuur en precisie-fabricagetechnologie. In het laatste basiselement zitten zowel de omvangrijke groep conventionele en niet-conventionele bewerkingsprocessen als de steeds belangrijker wordende assemblageprocessen.

Het vakgebied is georganiseerd rond drie internationale organisaties die nauw samenwerken en samen het vaktijdschrift 'Precision Engineering' uitbrengen met publicaties van de leden. De oudste organisatie 'Japan Society for Precision Engineering' (JSPE), opgericht in 1933, is met 7000 leden veruit de grootste, vóór de 'American Society for Precision Engineering' (ASPE) met ongeveer 1000 leden, opgericht in 1986, en vóór de European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EuSPEN). De laatste is in 1998 met financiële steun van de EU opgericht en heeft ongeveer 600 leden. Jaarlijks worden wetenschappelijke congressen georganiseerd waar nieuwe ontwikkelingen worden gepresenteerd en gepubliceerd als abstracts in de 'Conference Proceedings'. Uitgebreide publicaties kunnen daarna worden gepubliceerd in het vakblad.

De opstart van de leeropdracht in 1991 verliep voorspoedig omdat ik als universitair hoofddocent al een aantal jaren de sectie 'Dimensionele metrologie' leidde, waar onderzoek op dit gebied werd verricht. Daarnaast werd hier Metrologie-onderwijs verzorgd voor de faculteit Werktuigbouwkunde. Ook waren er al studenten en enige promovendi actief in het onderzoeksgebied, terwijl er eveneens een beperkte staf aanwezig was die na de opstart nog kon worden uitgebreid. Volgens de leeropdracht 'Precision Engineering' moesten onderzoek en onderwijs worden uitgebreid in de richting van het ontwerpen van



precisieapparatuur met aandacht voor precisie-fabricagetechnieken. Als sectie Precision Engineering hebben we ons gericht op deze doelstellingen. We besteedden veel aandacht aan internationale contacten, met name door deelname en bijdragen aan wetenschappelijke conferenties en het publiceren in de vakbladen. Naast de banden met bovengenoemde organisaties op het vakgebied bestond er in de sectie een hechte band met de grootste organisatie in de wereld voor onderzoek op het gebied voor Productietechnologie, 'CIRP'. Het laatste decennium is een deel van het onderzoekswerk van Precision Engineering gepubliceerd in het eigen tijdschrift van CIRP, de 'CIRP Annals', ook al omdat deze zijn opgenomen in de Citation Index en als zodanig goed scoren bij onderzoeksbeoordelingen.

Op nationaal niveau is na jaren onderhandelen tussen de drie Technische Universiteiten een formele samenwerking tot stand gekomen met het doel een onderzoeksschool Productietechnologie (IPV) te realiseren. Na de nodige administratieve en organisatorische handelingen is bij de KNAW een verzoek tot goedkeuring ingediend, dat na een beoordeling in 1998 werd gehonoreerd. Daarmee was de KNAW onderzoeksschool IPV een feit. Het penvoerderschap werd toegewezen aan de Universiteit Twente van waaruit ook de grootste vertegenwoordiging kwam. Vanuit de TU/e is vanaf het begin een bijdrage geleverd door de sectie Precision Engineering, die ook haar onderzoeksgebieden definieerde in IPV.

Het onderwijs over Precision Engineering in de faculteit Werktuigbouwkunde is gebaseerd op enkele basiscolleges met daarop voortbouwend colleges die meer geavanceerde toepassingen behandelen. De afsluiting is een college 'Bijzondere Onderwerpen Precision Engineering' waarin de nieuwste onderzoeksaspecten aan de orde komen met daarnaast bijdragen uit de precisie-industrie. In het basiscollege 'Inleiding metrologie' wordt zoals gebruikelijk in dit vak de nodige aandacht besteed aan het formuleren van meetuitkomsten bij meetprocessen en de berekening van de onnauwkeurigheid. Ook de analyse van het meetproces inclusief de modelbeschrijving ten behoeve van de bepaling van de onnauwkeurigheid krijgt veel aandacht (GUM 95). Daarnaast worden verschillende meetprincipes behandeld, die van belang zijn voor de dimensionele metrologie zoals het meten van lengte, hoek, vorm van objecten en oppervlaktegesteldheid. Ook het nauwkeurig

meten van temperatuur en de brekingsindex van lucht, beide van groot belang bij precisie lengte- en oppervlaktemetingen, worden behandeld. Het basiscollege ontwerpen en construeren op precisie, 'Constructieprincipes', levert de basiskennis voor het ontwerpen van precisie-apparatuur. Uitgaande van het vrijheidsgradenbeginsel en statisch bepaald construeren wordt aandacht besteed aan construeren op stijfheid en het vermijden van speling o.a. via toepassing van elastische elementen. Hierbij worden ook constructie-elementen besproken als rechtgeleidingen, scharnieren en koppelingen. Ook is er aandacht voor wrijving en hysteresis en hoe deze kunnen worden vermeden. Tenslotte worden specifieke overbrengingen en aandrijvingen behandeld en wordt enige aandacht besteed aan energiebeheer. Hier dient te worden gemeld dat dit college is gebaseerd op de vroegere colleges van Van der Hoek en Koster die de basis hebben gelegd voor dit deel van het onderwijs. Het college 'Toegepaste constructieprincipes' richt zich meer op het ontwerpen en construeren van precisiemachines. Daarbij wordt uitgegaan van eigen ervaringen die zijn opgedaan bij de vele ontwerpen die in de voorliggende periode zijn voltooid en in een aantal gevallen ook in eigen beheer zijn gerealiseerd. Hierbij werd in veel gevallen ook gebruik gemaakt van de kennis en inzichten die elders in de wereld zijn ontwikkeld.

Het college 'Nauwkeurigheid van machines' is in feite opgezet om het nauwkeurigheidsgedrag van machines en instrumenten te kunnen voorspellen. Deze kennis kan zowel bij bestaande als nieuw te ontwerpen machines worden toegepast. De gehanteerde modelbeschrijvingen laten toe naast mechanische, ook dynamische en thermomechanische positieafwijkingen te bepalen. De modelbeschrijvingen zijn gericht op het beschrijven van systematische, dus reproduceerbare, afwijkingen. De technieken zijn universeel toepasbaar voor machines en instrumenten, dus b.v. ook voor printers en wafersteppers. Zijn de machineafwijkingen reproduceerbaar dan is, mits er een geschikte machinebesturing aanwezig is, softwarematige compensatie van deze afwijkingen mogelijk. Daardoor kunnen aanzienlijke nauwkeurigheidsverbeteringen in machines en instrumenten worden bereikt.

De sectie heeft geen regulier onderwijs in precisie-fabricagetechnieken ontwikkeld, hier werd gebruik gemaakt van basiscolleges die door andere secties in de faculteit werden verzorgd. Wel is in het college 'Bijzondere onderwerpen – Precision Engineering' college-tijd ingeruimd om te rapporteren over specifieke aspecten van het onderzoek. Daarnaast



Recente ontwikkelingen in het vakgebied

wordt door gastsprekers van Philips een groot aantal speciale precisiebewerkingstechnieken besproken die daar zijn ontwikkeld en/of worden toegepast.

De komst naar de sectie, in 2002, van deeltijdhoogleraar prof. Compter, specialist in het ontwerpen en realiseren van elektromechanische systemen, maakte het mogelijk nog een extra college 'Ontwerpen van elektromechanische systemen voor precisietoepassingen' aan te bieden. Daardoor werd de mechatronische benadering bij het ontwerpen van precisieapparatuur benadrukt met als gevolg dat het meteen veel belangstelling kreeg van studenten.

In 1991 kreeg ik van mijn faculteit Werktuigbouwkunde het verzoek om naast mijn reguliere onderwijstaak samen met collega Vandeput van de faculteit Elektrotechniek binnen het TU/e-SAI een tweede fase opleiding 'Mechatronisch Ontwerpen' op te zetten, volgens een model dat al bij de UT was uitgewerkt. Het eerste jaar van deze mastersopleiding werd aan de studenten een mechatronisch gericht vakkenpakket aangeboden. Het tweede jaar was volledig gewijd aan het uitwerken van een mechatronische ontwerp opdracht, bij voorkeur uit te voeren in de industrie. Mijn sectie verzorgde in deze opleiding een drietal vakken en begeleidde met succes in totaal 27 afstudeerprojecten in deze opleiding. Met de komst van de Bachelor-Master structuur is besloten deze opleiding de facto in 2004 stop te zetten.

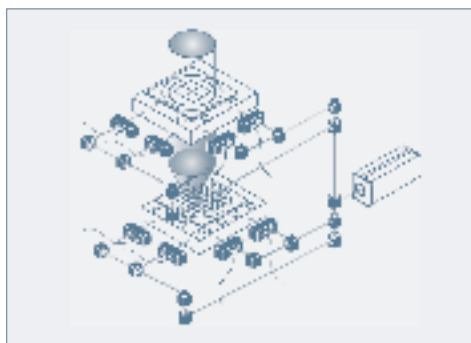
De laatste 15 jaar is het vakgebied sterk beïnvloed door de IC technologie en daarmee verwante gebieden als dataopslag en verwerking, de communicatie- en digitale foto- en filmtechnologie. De fysische en geometrische optica heeft ook een snelle ontwikkeling doorgemaakt door de komst van allerlei nieuwe applicaties in optische registratie en mobiele telefonie. Voor de elektronenmicroscopen zijn nieuwe toepassingen ontwikkeld. De bestaande limiteringen echter, de hoogvacuüm-eisen voor de objectomgeving, blijven bestaan. Wel is er voor metrologische toepassingen een ESEM ontwikkeld die in de objectomgeving minder hoge eisen stelt. Bij de verschillende typen elektronenmicroscopen kan (sub)nanometerresolutie bij objectdetectie worden bereikt evenals met verschillende typen Scanning Probe Microscopen (SPM). Ook hier is de laatste jaren een groot aantal verbeteringen aangebracht waardoor niet alleen de resolutie is verbeterd maar ook de meetnauwkeurigheid via herleidbaarheid naar de lengtestandaard (Wetz 98).

De laserinterferometrie is de afgelopen jaren toch de technologie gebleven die de hoogste precisie kan opleveren bij verplaatsings- en oppervlaktemetingen. Ook hier kan subnanometerresolutie worden bereikt. De precisie wordt echter beperkt door het fysisch gedrag van de laserlichtbron, de optische componenten en het medium waarin wordt gemeten, meestal lucht. De actuele golflengte van de laserlichtbron wordt bepaald door de fysische opbouw van deze lichtbron zelf en de lucht waarin wordt gemeten. Zo zal een drukverandering van 1 mbar een relatieve golflengteverandering van 10^{-8} veroorzaken, dit is een lengteverandering van 10 nm per meter (Cosij 04). Voor dit effect en andere invloedsfactoren moeten dus correcties worden aangebracht. De laserlichtbron en de optische componenten zoals prisma's en polariserende componenten veroorzaken ook periodieke afwijkingen in dit meetproces. De invloed is klein, maar is voor speciale metingen zoals bij toepassing in wafersteppers niet meer verwaarloosbaar. Het is overigens noodzakelijk de door de laserlichtbron uitgezonden golflengte te bepalen met behulp van een standaard laserlichtbron (Sche 86). In figuur 1 is een opstelling afgebeeld van de toepassing van

een laserinterferometer voor het meten van de positie van de wafer tafel in een waferstepper. Met deze meetopstelling worden meerdere verplaatsingen en hoeken gemeten, alles met nanometerprecisie! Uiteraard is er veel aandacht besteed aan de hiervoor aangegeven zaken die de nauwkeurigheid bepalen.

figuur 1

Schema van toepassing van een laserinterferometer in een waferstepper



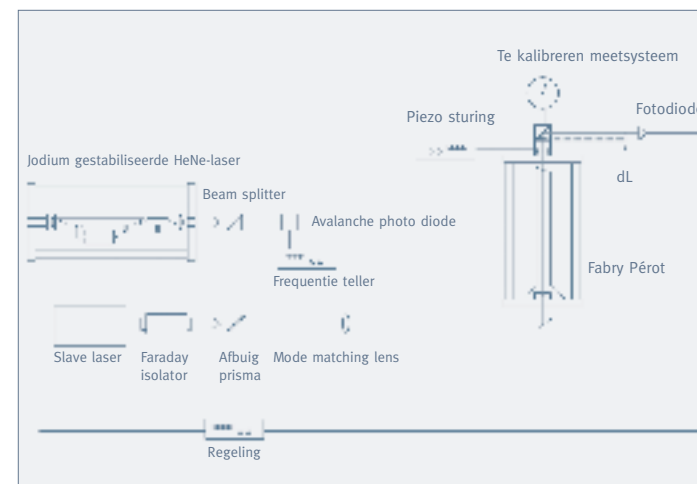
Interferometriemetingen in vacuüm zijn in principe nauwkeuriger dan metingen in lucht. De realisatie is in de praktijk echter erg gecompliceerd door de eisen die aan de vacuümsystemen en de gebruikte materialen moeten worden gesteld, evenals aan de opbouw van bewegende systemen, bijvoorbeeld de aandrijvingen en de geleidingssystemen. Dit wordt later nog toegelicht bij de beschouwing van toekomstige ontwikkelingen in de IC technologie. Naast de laserinterferometrie zijn in het laatste decennium veel nieuwe typen lineaire meetsystemen ontwikkeld voor toepassing als positiemeetsysteem in fabricagemachines en meetmachines. De meest gebruikte systemen bezitten een foto-elektrisch meetsysteem waarin gebruik wordt gemaakt van het Moire-effect, optredende tussen twee ten opzichte van elkaar bewegende rastersystemen (Heid 98). Meer recent zijn meetsystemen geïntroduceerd, ook van het foto-elektrische type, waarbij buiging van licht aan roosters wordt gecombineerd met interferentie van afgebogen lichtbundels uit de nulde en eerste orde. De gebruikte rastersystemen (Heid 98) hebben een steek die ligt tussen 20 μm en 0,5 μm voor de beste interferentiesystemen. Door 1000-voudige elektronische interpolatie komt de resolutie voor de beste systemen in

het subnanometerniveau. De kalibratie dient ook hier met behulp van laserinterferometrie te worden uitgevoerd.

Een probleem bij kalibratie, op nanometerniveau, van capacitieve en inductieve sensoren en lineaire meetsystemen zijn de mogelijke kleine periodieke afwijkingen die in laserinterferometers voorkomen. Daarvoor zijn door enkele laboratoria in de wereld meetmethoden en instrumenten ontwikkeld om deze periodieke afwijkingen vast te kunnen stellen. Een schema van dit type meetopstelling is weergegeven in figuur 2 (Cosij 04, Wetz 98). Dit schema toont een instelbare Fabry-Perot interferometer waarin straling van een instelbare laserlichtbron wordt ingekoppeld, zodanig dat de lengte van deze precies een veelvoud is van de gebruikte lasergolflengte. Verandering van de Fabry-Perot lengte dL , die ook gemeten wordt met de te kalibreren sensor, is nu proportioneel met de frequentieverandering df van de instelbare laser. Het verschil df wordt gemeten via vergelijking met een standaardlaser waarna dL kan worden bepaald. De onnauwkeurigheid in dit type kalibratie is voor een meetgebied van enkele μm op de TU/e bepaald op 0,8 nm, waarvan de helft wordt veroorzaakt door temperatuuffecten. Er zij hier opgemerkt dat de meetopstelling ook kan worden gebruikt om periodieke afwijkingen in laserinterferometers vast te stellen.

figuur 2

Schema kalibratieopstelling voor nanosensoren (Cosij 04)





Oppervlakmetingen

Door de toenemende nauwkeurigheidseisen voor metingen van precisieoppervlakken zijn de laatste 15 jaar veel meettechnieken beschikbaar gekomen. Het gaat hier om topografische technieken en technieken om de structuur vast te leggen inclusief een dunne laag onder het oppervlak, de 'subsurface'. Deze laag is in een aantal gevallen van bijzondere betekenis, zoals bij toepassing in IC technologie. Een zeer goed overzicht van de verschillende meetprincipes en hun toepassing is gegeven in het artikel van Lucca et al (Lucca 98). Het merendeel van de topografische technieken is gebaseerd op SPM- en ruwheidsmeetapparatuur voor de karakterisering van kleine oppervlakken en oppervlakteinterferometrie voor de grotere oppervlakken. Moderne ruwheidsmeetapparatuur levert de beste resultaten wanneer herleidbare metingen naar de standaard gewenst zijn, maar is niet altijd toepasbaar omdat lichte beschadiging van het oppervlak mogelijk is. Met SPM, met name de Atomic Force Microscope (AFM), zijn contactloze metingen uit te voeren maar deze zijn meestal niet herleidbaar naar de standaard. De AFM heeft het grote voordeel dat deze voor alle typen oppervlakken, zelfs biologische, kan worden toegepast. Dit in tegenstelling tot vele andere typen SPM die bijvoorbeeld materiaalafhankelijk kunnen zijn (Doeb 04). Er zij hier opgemerkt dat de preparatie van de te meten objecten bijzondere zorg vereist, vooral ten aanzien van het reinigen van de oppervlakken. De oppervlakteinterferometrie is gebaseerd op de Fizeau- of Michelson-interferometers met specifieke aanpassingen om nanometerresolutie te realiseren (Jans 05). Deze metingen zijn altijd verschilmetingen met een referentie-spiegeloppervlak, waarvan de afwijkingen bekend moeten zijn op het gewenste nauwkeurigheidsniveau zodat compensatie mogelijk is. Meetonnauwkeurigheid op nanometerniveau is bereikbaar via multifasemetingen, waarbij achtereenvolgens of parallel interferentiemetingen aan oppervlakken worden uitgevoerd bij kleine bekende verplaatsingen van het referentieoppervlak. Door de resultaten te vergelijken kan het werkelijke oppervlak gereconstrueerd worden. Zijn de verschillen tussen het referentie- en het te meten oppervlak te groot, lokaal enkele μm of meer, dan dient het oppervlak in delen te worden gemeten waarna de metingen gekoppeld moeten worden om het resultaat van het gehele oppervlak vast te kunnen leggen (stitching). Bij dit type metingen zijn omgevingsinvloeden zoals trillingen en luchtbewegingen meestal niet verwaarloosbaar en stellen deze eisen aan

de opbouw van de meetopstelling (FanY 98, Jans 05).

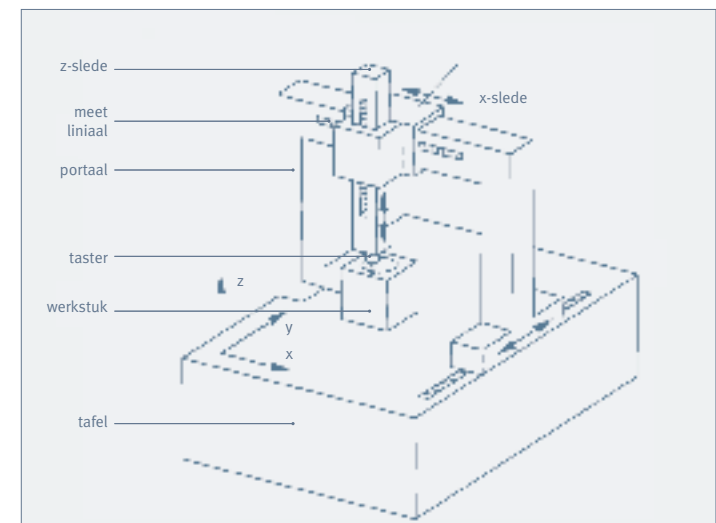
Externe eisen worden gesteld aan de spiegels die toegepast worden in de toekomstige generatie lithografiemachines voor de belichting van wafers. Deze gekromde spiegels, met diameters tot 200 mm, mogen toelaatbare vormafwijkingen hebben tot 1 nm terwijl de ruwheidsafwijkingen daar ruim onder moeten liggen! Meettechnologie voor dit type meetopdrachten is nu in ontwikkeling (Beck 02) en stelt uiteraard bijzondere eisen aan de gewenste meetapparatuur.

Dimensioneel meten met coördinatenmeetmachines (CMM)

Na de introductie van de automatische 3D-meetmachines in de jaren zeventig zijn de wijzigingen in de concepten het laatste decennium beperkt gebleven. Toenemende precisie-eisen hebben het gebruik van specifieke materialen, zoals keramiek en aluminium, bevorderd terwijl ook de sledelageringen aanmerkelijk zijn verbeterd door toepassing van nieuwe typen luchtbagagers. Daarnaast zijn de eerder besproken hoge precisie lineaire meetsystemen toegepast. Door het gebruik van deze meetsystemen en toepassing van lichte, stijve materialen en nieuwe lagerconstructies is de reproduceerbaarheid aanzienlijk verbeterd.

figuur 3

Schema 3D-coördinatenmeet-machine



Ook is er veel aandacht besteed aan de ontwikkeling van nieuwe sensoren, het aantaststelsel, waarmee in 3D de objectgrenzen worden vastgesteld. Het aantaststelsel maakt onderdeel uit van de 'meetlus' en beïnvloedt dus direct de meetnauwkeurigheid van de machine. Dit houdt in dat aan de reproduceerbaarheid en nauwkeurigheid van het tastsysteem extreme eisen dienen te worden gesteld, een onnauwkeurigheid kleiner dan $0,1 \mu\text{m}$ bij een reproduceerbaarheidsafwijking kleiner dan 10 nm is gangbaar. Een mechanisch schema van een dergelijke meetmachine is afgebeeld in figuur 3.

Bij het afgebeelde machinetype is het tastsysteem verbonden met de z-as van de machine die zelf is gelagerd in de slede van de x-as. Deze as is op een portaalconstructie die langs de y-as kan worden verplaatst. Elke as bezit een geleidingssysteem met luchtlagering en een precisie lineair meetstelsel. Uiteraard bezit elke as een positionersysteem dat vanuit een centrale PC kan worden bestuurd. De PC is uitgerust met de nodige software om het meetproces te besturen en de meetuitkomsten te berekenen uit de bepaalde meetgegevens die in principe per meetpunt bestaan uit de coördinaten x,y,z van het meetpunt. Het minimum aantal meetpunten wordt bepaald door de geometrie die men wenst te meten. De meest recente software biedt de mogelijkheid de onnauwkeurigheid van meetuitkomsten van geometrische elementen, zoals diameters, vlakken, afstanden van gaten, ligging van vlakken en cilinders realistisch te bepalen. Door gebruik te maken van in 3D metende tastsystemen is het met deze software mogelijk te meten tijdens het bewegen langs een oppervlak. Het tastsysteem blijft daarbij in contact met het oppervlak, zodanig dat het tastsysteem in zijn meetbereik blijft. Ook wordt nu softwarematige compensatie van bekende geometrische en thermomechanische afwijkingen doorgevoerd waardoor de meetnauwkeurigheid van deze machines belangrijk is verbeterd. Een relatieve meetonnauwkeurigheid, per as, kleiner dan 10^{-6} is met dit type machines haalbaar.

Men mag stellen dat de nauwkeurigheidsgrenzen van dit type machines daarmee bereikt worden. Wil men de nauwkeurigheidsgrenzen significant verleggen dan zullen andere machineconcepten moeten worden ontwikkeld die veel minder gevoelig zijn voor de hoofdbronnen van afwijkingen voor deze machines:

- Geometrische afwijkingen in assen en verbindingselementen tussen assen

- Afwijkingen in de positiemeetsystemen
- Vervormingen van assen en verbindingselementen door mechanische en thermische invloeden, veroorzaakt door zowel interne als externe bronnen
- Afwijkingen in tastsystemen

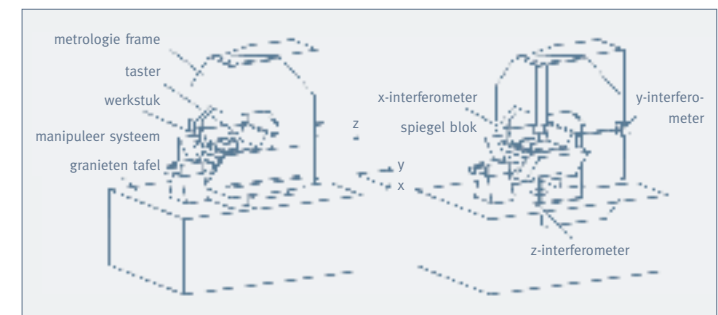
In principe zijn, zoals eerder al is gesteld, reproduceerbare afwijkingen te compenseren via het meten ervan, gevolgd door softwarematige compensatie. Deze compensaties zijn echter niet perfect door te voeren, kosten veel kalibratietijd en mogelijk extra sensoren om de effecten te meten. Ontwerpen van machines die bronnen in principe elimineren verdienen dus de voorkeur. De laatste jaren zijn er diverse machineconcepten gerealiseerd die deels op bovenstaande overwegingen zijn gebaseerd (Teague 97, Pegg 99, Ruijl 01, VerM 99).

Een voorbeeld van een meetmachineconcept voor nanometermetrologie is de CMM die in het Philips CFT is ontwikkeld, overigens ook met enige bijdragen vanuit TU/e-PE.

Het principe van deze machine is schematisch weergegeven in figuur 4.

figuur 4

CMM voor nanometermetrologie (Ruijl 01)



In dit concept is gekozen voor nagenoeg gescheiden kracht- en metrologielussen zodat krachteffecten minimaal doorwerken in de metrologielus. De metrologielus loopt door een apart frame dat de meetelementen van drie interferometers draagt voor de x,y,z meetassen. Deze orthogonale meetassen eindigen op drie orthogonaal opgestelde vlakke spiegels die star met de bewegende meettafel, met meetobject, zijn verbonden. De virtueel doorgetrokken meetassen eindigen in



het meetpunt van het tastsysteem dat aan het andere einde van de metrologielus is gemonteerd, waardoor de machine in zijn meetassen aan het Abbeprincipe voldoet. Deze machineconstructie elimineert een groot deel van de geometrische afwijkingen, mede door de toepassing van een vlakke spiegel interferometer langs de drie assen. Van groot belang blijft wel de orthogonale opstelling van de spiegels en de vlakheid ervan. Ook voor de thermomechanische effecten, met name de lineaire uitzetting van het meetframe, dienen zorgvuldig correcties te worden aangebracht. Uiteraard moeten ook correcties voor de omgevingsinvloeden op de lasergolflengte worden aangebracht. Om de uitzettingseffecten van de meettafel te minimaliseren is hier als materiaal zerodur gebruikt vanwege de zeer lage uitzettingseffecten. Tijdens het onderzoek, dat tevens diende om een promotie voor te bereiden, is geen specifiek tastsysteem ontwikkeld, mede omdat elders onderzoek werd uitgevoerd aan deze specifieke tastsystemen (Peggs 99, Pril 02).

Een eerste nauwkeurigheidanalyse, uitgevoerd nadat kalibratiegegevens van het prototype bekend waren, leverde na compensatie voor thermomechanische afwijkingen een volumetrische afwijking kleiner dan 30 nm op in het meetvolume van $100 \times 100 \times 40 \text{ mm}^3$. De thermische resteffecten van uitzetting van het meetframe beïnvloeden de nauwkeurigheid in forse mate. Wordt namelijk het aluminium meetframe vervangen door een goede kwaliteit invar, dan kan deze afwijking reduceren tot enkele nm bij verder gelijkblijvende meetcondities.

Dit is een veelbelovend resultaat voor een machine met een meetvolume dat ruim voldoende is voor een grote klasse van precisieproducten van nu en de nabije toekomst.

Ontwerpen van precisie-instrumenten en -machines

Omdat 'ontwerpen' een bezigheid is die voor velerlei uitleg vatbaar is, geef ik een summier uitleg van wat hier met ontwerpen wordt bedoeld. Uitgaande van technische specificaties wordt een mechanisch product omschreven zodanig dat het fabriceerbaar is en dat theoretisch, via schetsen, analyses en berekeningen, is aangetoond dat het beoogde product aan deze specificaties kan voldoen.

Dit deel van het vakgebied Precision Engineering is eigenlijk al vele honderden jaren oud omdat vroeger fysici en chemici hun eigen specifieke apparatuur dienden te ontwerpen en te realiseren daar deze

niet anders verkrijgbaar was. In de literatuur zijn daarvan prachtige voorbeelden te vinden. Met name het boek van Evans (Evan 89) geeft een goed historisch overzicht van de ontwikkelingen van het vakgebied met veel persoonlijke details. Het is uit dit werk duidelijk dat veel belangrijke ontwerpprincipes ontstonden in de periode 1775-1875. Voor de dimensionale metrologie was het onderzoek van Adam Michelson (Mich 27) van groot belang. Hij ontwikkelde de interferometrie tot een echte precisiemeettechniek en ontwikkelde daarbij ook de apparatuur om precisiemetingen uit voeren. Hij demonstreerde dit door de toenmalige lengtestandaard, de Pt-Ir meterstaaf, via de door hem ontworpen interferometer, te vergelijken met de primaire stralingen die een cadmium gasontladingslamp levert. Hij vond met zijn apparatuur dat deze meter vergelijkbaar was met 1553163,5 golflengten rood licht, 1966249,7 golflengten groen licht en 2083372,1 golflengten blauw licht. Dit alles gemeten bij een luchttemperatuur van 15°C en een druk van 760 mm Hg volgens de toen geldende definities. Hij claimde een onnauwkeurigheid van $5 \cdot 10^{-7}$ wat ronduit indrukwekkend was. Hij toonde met deze experimenten aan dat het verstandig was de meter te definiëren via de golflengte van een goed gedefinieerde lichtbron, deze was nauwkeuriger en eenvoudiger te reproduceren dan de meterstaaf. De specifieke ontwerpknis voor het vakgebied heeft zich in de loop van de 20e eeuw verspreid via bedrijven en kennisinstellingen. De ontwerpknis is voor een deel vastgelegd in speciale boeken (Sloc 92, Evan 89, Tani 96, Smit 92), het meeste is echter verspreid door de PE organisaties via speciale seminars, georganiseerd voorafgaande aan de jaarlijkse congressen. Met name via de 'design seminars' van ASPE zijn de ontwerpinzichten, 'design patterns', betreffende het ontwerpen van precisieapparatuur aan de leden overgebracht. Veel specifieke ontwerpen zijn vooral de laatste twee decennia gepresenteerd tijdens de jaarlijkse conferenties van ASPE, JSPE en meer recent Euspen. De gegevens zijn via abstracts vastgelegd in de 'Conference Proceedings' van de betreffende conferenties en zijn bij de secretariaten beschikbaar, voor een deel in digitale vorm.

De ontwikkelingen in het ontwerpen van precisieapparatuur zijn door ons samengevat in een ruim overzichtsartikel dat in 1998 in de 'CIRP Annals' (Sche 98) is gepubliceerd.

Belangrijke precisie-ontwerpaspecten worden daar besproken zoals:

- Ontwerpen gericht op reproduceerbaarheid, het vermijden van niet-deterministisch gedrag



- Scheiden van kracht- en metrologieframe
- Toepassing van Abbe- en Bryanprincipe
- Materiaalkeuze voor precisietoepassingen, specifieke stijfheid en thermomechanisch gedrag
- Kinematische constructies en vrijheidsgradenbeschouwing
- Ontwerpen van elastische elementen zoals koppelingen, draaipunten en rechtgeleidingen
- Ontwerpen van wrijvingsarme lagersystemen
- Gebruik van lineaire meetsystemen
- Ontwerpen van precisie-tastsystemen voor meetmachines
- Ontwerpen van precisieaandrijfsystemen
- Reductie van stoorkrachten
- Isolatie van omgevingsinvloeden
- Analyse van het kinematisch, thermomechanisch, dynamisch en regeltechnisch gedrag van een ontwerp
- Afwijkingencompensatie via software

Veel van de hier genoemde ontwerpaspecten zijn toegepast in bekende ontwerpen van precisiemachines (Ruyt 02, Brya 79, Teag 97, Tani 96, VerH 99, VerM 99).

Als voorbeeld wordt hier nog genoemd het ontwerp van een precisiebewerkingsmachine die ook als prototype op de TU/e is opgebouwd en getest. Het gaat om de ontwerpdracht die in het kader van een promotieonderzoek is uitgevoerd op de TU/e met financiële ondersteuning van het SAI ter plaatse.

Hoewel een forse lijst met ontwerpspecificaties was geformuleerd, kan gesteld worden dat de hoofddoelstelling was de ontwikkeling van een precisieverspaningsmachine voor het verspanen van nonferro metalen en kunststoffen met optische kwaliteit. De optische kwaliteit komt tot uiting in een vormnauwkeurigheid kleiner dan $0,1 \mu\text{m}$ bij een oppervlakteruwheid R_a kleiner dan 10 nm . Dit is gemeten over de maximale diameter van 300 mm . Door strikt de ontwerpregels toe te passen is een in vele opzichten unieke machine ontstaan waarin vele noviteiten zijn ontstaan die voor een deel later ook elders zijn toegepast. Een uitgebreide beschrijving van het ontwerpproces, de analyses, de gemaakte keuzes en bouw en tests van het prototype is te vinden in de dissertatie van J. Vermeulen (VerH 99).

De ontwerpprincipes zoals die hiervoor zijn besproken zijn in principe ook toepasbaar bij het ontwerpen van precisiemicrosystemen. In de fabricage kunnen echter forse problemen ontstaan doordat de conventionele technieken voor het vervaardigen van de onderdelen en de assemblage niet meer toepasbaar zijn. Dit kan betekenen dat het beoogde ontwerp met de bestaande fabricageprocessen niet maakbaar blijkt te zijn. Dit dwingt de ontwerper tot een alternatieve ontwerpoplossing of tot de ontwikkeling van alternatieve fabricageprocessen. Ook het ontwerp van specifieke lagerconcepten zoals vloeistof- en luchtlagers levert op deze schaal problemen op, evenals de assemblage van onderdelen (Brus 00).

Precisiefabricagetechnologie

Dit deel van Precision Engineering richt zich op de aspecten van het fabricageproces van precisieproducten, dus de ontwikkeling van methoden, processen en assemblage.

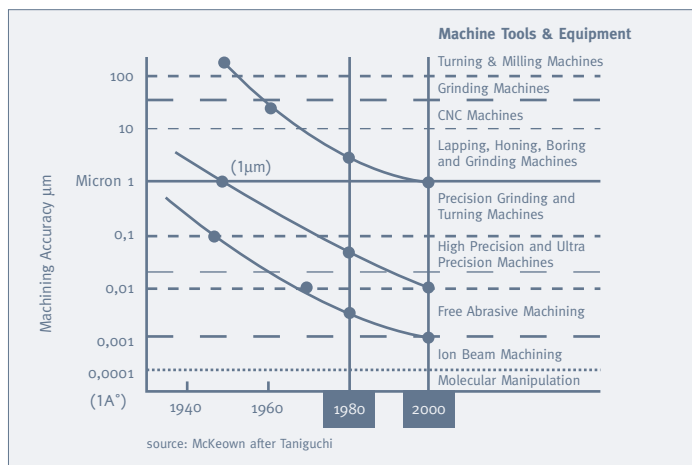
CIRP is de erkende organisatie in de wereld op dit onderzoeksgebied, waar resultaten van het onderzoek worden besproken en gepubliceerd, dit vooral tijdens het jaarlijkse congres in augustus. Daarnaast zijn er interne presentaties in de bijeenkomsten van technische commissies (STC) die tweemaal per jaar worden gehouden. Van groot belang zijn de 'keynotepapers' die meestal door een aantal specialisten in het vakgebied worden geschreven, na eerst uitgebreid in de technische commissies op onderdelen te zijn besproken. Deze keynotes worden uiteindelijk in deel twee van de 'CIRP ANNALS' (CIRP 04), die steeds in het najaar verschijnen, gepubliceerd.

Uit dit deel komt dan ook een aanzienlijk stuk van de informatie betreffende precisiefabricagetechnologie; de referenties zullen duidelijk worden aangegeven.

Er zij hier opgemerkt dat ook een groot aantal internationaal gerichte bedrijven lid is van CIRP en actief bijdraagt aan de ontwikkelingen in het vakgebied 'Manufacturing Technology', zoals het binnen deze organisatie wordt aangeduid. Precision Manufacturing wordt in de organisatie niet in een aparte technische commissie bewerkt maar de bijdragen komen naar keuze uit de technische commissies. Uit de verschillende publicaties kan een belangrijke conclusie worden getrokken: de Taniguchi trend (Tani 83) voor verspanende bewerkingen zet door, evenals de ontwikkelingen in de IC technologie.

Deze precisie-trend is in door Byrne aangepaste vorm (Byrn 03) weergegeven in figuur 5.

Taniguchi trend
 'Precision Cutting
 Technology'



figuur 5

In dezelfde publicatie worden ook de mogelijkheden van verspanende bewerkingen vergeleken met andere typen bewerkingen zoals EDM, LIGA en laserbewerken. Het is duidelijk dat precisieverspanen hoog scoort bij het maken van zeer gladde oppervlakken. Masuzawa heeft in een recente publicatie een overzicht gegeven van de ontwikkelingen van fabricagemethoden voor microproducten (Masu 00). Hij beschrijft het bewerkingsgebied met afmetingen van 1 tot 500 µm. Masuzawa onderscheidt acht hoofdgroepen van bewerkingsmethoden en geeft voorbeelden van de verschillende typen bewerkingstechnieken. Daarnaast geeft hij aan wat mogelijk is met de verschillende processen in de zin van de productvorm en bereikbare precisie. Duidelijk is dat schalingswetten ten aanzien van de precisie van 'gewone' producten naar microproducten niet gelden. Relatieve vormnauwkeurigheid en oppervlakteruwheid nemen duidelijk toe bij microproducten. Ook is duidelijk dat veel 'conventionele' technieken zoals draaien, frezen, slijpen en vonkverspanen worden toegepast bij de fabricage van microproducten en gereedschappen. Wel worden steeds meer specifiek ontwikkelde machines toegepast, zoals ook bleek uit presentaties bij Euspen 2002 in Eindhoven (Eusp 02). Een goed overzicht van typen oppervlaktestructuren die tegenwoordig met precisiebewerkingstechnieken fabricerbaar zijn is te vinden in het

artikel van Evans en Bryan (Evan 99). Hier worden ook de functies, de bewerkingstechnieken en de metrologie van deze oppervlakken besproken.

Een leuk voorbeeld van microbewerken en microassembleren is het microtaststelsel dat in de sectie Precision Engineering is ontwikkeld. Het zal nader worden toegelicht in de volgende paragraaf.

In het CIRP overzichtsartikel 'Micro Engineering' van Alting (Alti 03) wordt meer de nadruk gelegd op het ontwerpen en vervaardigen van microsystemen. Hier wordt de definitie van 'microstelsel' ruimer genomen: een of enkele functies moeten micrometerefineringen bezitten. Na een beschouwing over mogelijke ontwerpmethoden voor microsystemen, overigens komen de auteurs niet tot een aanbevolen ontwerpmethodiek, wordt ook nader ingegaan op fabricagemethoden van microproducten en microsystemen. Dit deel is sterk gerelateerd aan het overzicht dat Masuzawa eerder heeft gegeven. Ten slotte wordt aandacht gegeven aan de metrologie en kwaliteitsbeheersing van microproducten in de ruimste zin. De terechte conclusie is, dat de micro- en nanometrologie, inclusief kalibratietechnieken, nog onvoldoende zijn ontwikkeld om aan de toekomstige behoeften te kunnen voldoen. Een voorbeeld van dit type specifieke metrologie is de kalibratieopstelling voor microtastsystemen die door Pril (Pril 02) is ontwikkeld.

Onder leiding van Van Brussel (Brus 00) heeft een groep van specialisten recente ontwikkelingen rond de assemblage van microsystemen beschreven. Dit overzichtsartikel geeft een zeer goed beeld van de ontwikkelingen en behandelt vrijwel alle aspecten van deze assemblagetechnologie. Na een korte bespreking van de problemen die kunnen voorkomen bij de assemblage van microproducten, zoals het hanteren, het waarnemen en positioneren en de assemblagekosten, wordt een aantal assemblagesystemen besproken. Vervolgens komen gereedschappen voor het hanteren van de producten aan de orde, de soorten grippers en grippertechnieken en de problemen bij het positioneren, meestal tengevolge van de invloed van krachten die in de macrowereld geen rol spelen. Ook wordt een aantal verbindingstechnieken voor micro-onderdelen besproken, voor een deel ook bekend uit de micro-elektronica en IC technologie. Na een korte behandeling van enige geassembleerde microsystemen wordt terecht geconcludeerd dat de assemblage in de microwereld duidelijk afwijkt van die in de macrowereld en een fundamenteel nieuwe aanpak vraagt.



Het onderzoek in de sectie Precision Engineering wordt steeds gestuurd vanuit de drie hoofdlijnen van Precision Engineering: dimensionele metrologie, ontwerpen van precisiesystemen en precisiefabricage. Hierna wordt een samenvatting gegeven van de belangrijke onderzoekslijnen en de bereikte resultaten.

Dimensionele metrologie

Dit deel van het onderzoek is vooral gericht op de ontwikkeling van methodieken en specifieke concepten voor meetapparatuur. Het onderzoek werd bijzonder gestimuleerd door de realisatie, in 1999, van speciale laboratoria met uitzonderlijk goede conditionering voor temperatuur en stofcondities. Hierna worden kort de belangrijkste ontwikkelingen besproken.

Softwarematige compensatie van afwijkingen in precisiemachines. Deze ontwikkeling is onder te verdelen in de volgende deelontwikkelingen:

- Modelmatige beschrijving van machinetype-afhankelijke afwijkingen en de simulatie van het afwijkingengedrag, vooral gebaseerd op de effecten van geometrische en thermomechanische aard. De modelbeschrijvingen kunnen worden toegepast op instrumenten en meet- en fabricagemachines (Teeu 89, Theu 91, Soon 93, Spaa 95, Week 96, Flor 02).
- Realisatie van efficiënte technieken voor het bepalen van de afwijkingenparameters die in de modelbeschrijvingen zijn vastgelegd. In principe zijn er twee technieken om deze parameters te bepalen, namelijk door gerichte metingen per parameter, zoals rechtheid, haaksheid, rotatie om de z-as etc. of door volumetrische metingen waar uit meerdere metingen genoemde parameters worden geschat. Met name de volumetrische meettechnieken en de bepalingen van de afwijkingenparameters zoals door Soons en later Florussen zijn ontwikkeld, zijn van grote waarde gebleken en in ruime mate industrieel toegepast voor het vaststellen van de geometrische afwijkingen van meet- en fabricagemachines (d'Hoo 00). Florussen heeft in zijn onderzoek zowel de

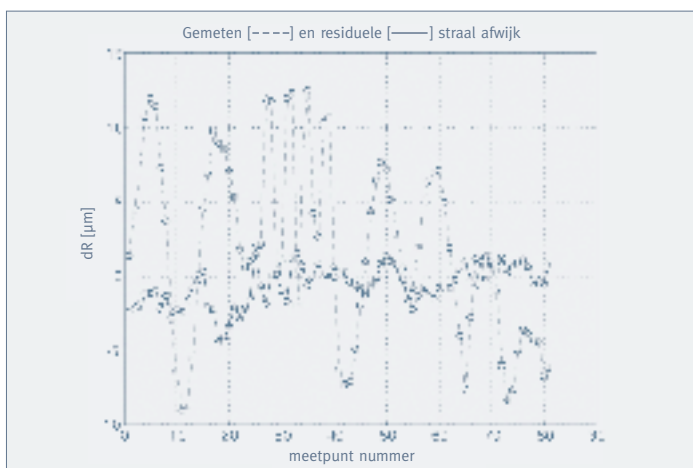
geometrische als thermomechanische afwijkingen van een 5-assige bewerkingsmachine modelmatig beschreven, zodanig dat voor de benodigde volumetrische metingen gebruik kon worden gemaakt van een commercieel beschikbaar meetinstrument, de telescopische 'ballbar'. Hierbij worden radiusafwijkingen gemeten met de ballbar langs een nominaal bolvormig oppervlak dat door de machine wordt doorlopen ten opzichte van een vast punt op de machinetafel. Uit de gemeten radiusafwijkingen op een beperkt aantal punten kunnen, met de ontwikkelde modelbeschrijvingen, zowel de geometrische als thermomechanische afwijkingen van de bewerkingsmachine worden bepaald. Vooral het bepalen van de stationaire geometrische machineafwijkingen lukt zeer goed met deze methode zoals in figuur 6 is weergegeven. Er valt af te lezen dat voor 80 ballbar-metingen in het volume van de machine een afwijkingenreductie van een (80 %) bereikt is. Het bepalen van het thermomechanisch gedrag is een stuk lastiger vanwege het instationaire karakter van de afwijkingen en de modelbeschrijving ervan. Een representatief resultaat is gegeven in figuur 7, waaruit valt af te lezen dat een afwijkingenreductie van gemiddeld 60 % te bereiken is. Het residu is in beide grafieken het verschil tussen de gemeten en berekende waarde van de positieafwijking. Er is in figuur 7 gemeten over een machinetijd van ongeveer 12 uur waarvan 6 uur opwarming bij een toerental 6000 rpm en 6 uur afkoeling bij stilstand. Het voordeel van de ballbarmetingen is dat ze snel kunnen worden uitgevoerd ten opzichte van interferometrische metingen, het nadeel is dat de meetnauwkeurigheid enkele um per meetpunt is en daarmee dus niet geschikt voor de kalibratie van CMM's. Daar wordt de interferometrische volumetrische meettechniek toegepast (Soon 93, d'Hoo 00).

- Softwarematige compensatie van reproduceerbare afwijkingen. Deze compensatie kan worden uitgevoerd mits de kwantitatieve informatie van de afwijkingen in het betreffende machinetype en de bijbehorende modelbeschrijvingen beschikbaar zijn en in de besturingssoftware van de machine kunnen worden ingevoerd. De informatie over de machineafwijkingen is altijd positieafhankelijk (x,y,z,...) en soms ook tijdsafhankelijk, met name bij thermomechanische afwijkingen. Compensatie is uiteraard niet perfect uit te voeren, de modelvorming van de machine en de precisie van de benodigde metingen bepalen samen wat het residu zal zijn, het verschil tussen de gemeten waarde

na softwarematige compensatie en de ingestelde machinepositie. Voor precisie-CMM's kan het residu op het submicronniveau liggen, de nieuwste 'nano-CMMs' bereiken bij goede kalibratie en afwijkingencompensatie positieafwijkingen van enige tientallen nanometer (Ruijl 02).

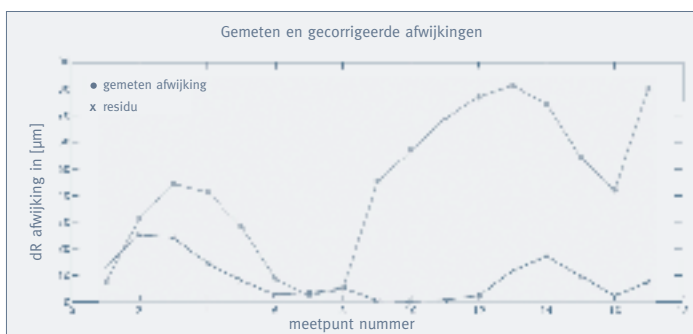
figuur 6

Geometrische afwijkingen bewerkingsmachine voor en na compensatie



figuur 7

Thermechanische afwijkingen bewerkingsmachine voor en na compensatie

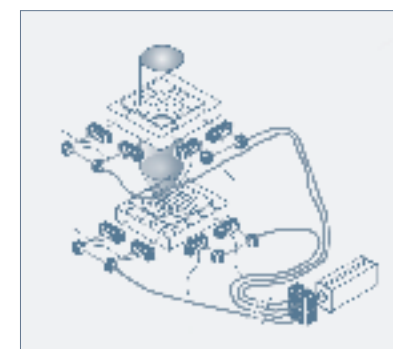


Interferometrie

Al sinds 1975 wordt in de faculteit Werktuigbouwkunde onderzoek verricht aan interferometrische meettechnieken voor toepassing bij dimensionele metingen van de hoogste precisie. Toen micrometerniveau, nu in 2004 het nanometerniveau. Dit onderzoek kan worden opgesplitst in twee onderdelen: verbetering van de nauwkeurigheid van laserinterferometers en de ontwikkeling van kalibratiemethodieken. Het onderzoek betreffende de nauwkeurigheid van technische laserinterferometers werd in 1985 afgesloten met een proefschrift (Sche 86) waarin methoden worden beschreven om onderdelen van laserinterferometers en het gehele instrument te kalibreren. Naast de kalibratie van de laserlichtbron wordt daar aandacht besteed aan het functioneren van het meetsysteem inclusief de zeer belangrijke meting van de brekingsindex van lucht. Voor het meten van de brekingsindex is een laserrefractometer ontwikkeld waarmee direct en met hoge precisie de brekingsindex kan worden bepaald. Het alternatief is de druk, temperatuur, vochtigheid en het koolstofdioxidegehalte van de lucht te meten en daaruit de brekingsindex te berekenen (Sche 86, Cosij 04). Er is toen nog geen aandacht besteed aan de polarisatie-eigenschappen van laserinterferometers en de invloed ervan op de nauwkeurigheid. Deze effecten werden voor het eerst beschreven door Hou (Hou 92) en zijn met nanometerprecisie gemeten door Wetzels (Wetz 98) met door hem ontwikkelde technieken voor de kalibratie van nanometersensoren. Een gemodificeerd schema van de door hem ontwikkelde meetopstelling is eerder gegeven in figuur 2.

figuur 8

Schema interferometer meetopstelling met fibers in een waferstepper

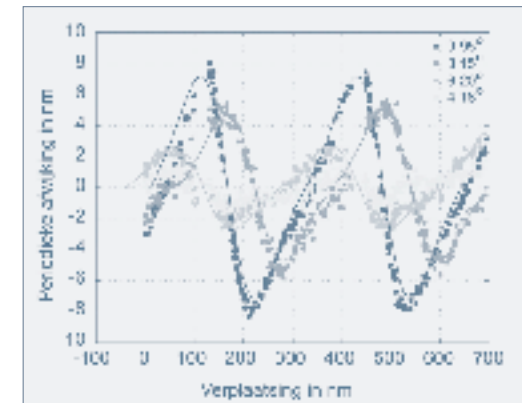


Knarren (Knar 03) heeft onderzocht wat het effect is op de polarisatietoestand van heterodyne laserlichtbronnen bij transport van de straling door optische fibers. Bij heterodyne laserlichtbronnen worden twee orthogonale lineaire polarisaties uitgezonden die beide gebruikt worden in het interferometergedeelte. Bij transport van laserlicht door fibers kan de relatief warme laserbron verder van de meetopstelling geplaatst worden. Dit kan de invloed sterk reduceren, evenals het aantal optische componenten. Een suggestie voor een nieuwe opzet van de lasermeetopstellingen in een waferstepper is afgebeeld in figuur 8.

Het probleem hierbij is simpel te omschrijven: de gepolariseerde laserstraling moet met dezelfde eigenschappen uit de fiber komen als ze erin gebracht is, anders zal er nauwkeurighedsverlies in de interferometer daarachter optreden. Knarren heeft in zijn onderzoek aangetoond dat het mogelijk is, met een goede kwaliteit monomode fibers en de juiste in- en uitkoppelsystemen, het verlies aan precisie te beperken tot hooguit enkele nanometers voor fiberlengten tot 50 m. Parallel aan het onderzoek van Knarren heeft Cosijns onderzocht wat de effecten zijn van imperfecte polarisatietoestanden in heterodyne laserinterferometers (Cosij 04). In principe zijn er twee oorzaken voor de imperfectie: afwijking in de orthogonaliteit en afwijking van de lineaire polarisatie, met name kan enige ellipticiteit ontstaan. Cosijns heeft rekenmodellen ontwikkeld waarmee de effecten kunnen worden voorspeld. Dit geldt voor alle componenten die in een interferometer kunnen voorkomen, dus de lichtbron, spiegels, prisma's, polarisatoren, detectoren etc. Een probleem bij het gebruik van polariserende elementen in de interferometer meetopstelling is, dat bij niet-perfecte uitlijning van de componenten er nog extra afwijkingen ontstaan door menging van de resulterende polarisaties. Ook hier is in de modelvorming rekening mee gehouden. Uit de resultaten van simulaties werd duidelijk dat de effecten van niet-perfecte uitlijning veel groter zijn dan de effecten van imperfectie in orthogonaliteit en lineairiteit. De effecten leveren periodieke afwijkingen met amplitudes in het (sub)nanometergebied. In figuur 9 zijn meetresultaten van uitlijneffecten vergeleken met simulaties vanuit de modellen.

Uit de resultaten blijkt dat de simulaties de metingen zeer goed voorspellen en dat dus de modelvorming correct is uitgevoerd. In het onderzoek van Cosijns is ook de nodige aandacht besteed

Gemeten
uitlijneffecten en
simulaties vanuit
modelvorming



figuur 9

aan de nauwkeurige bepaling van de brekingsindex van lucht. De onnauwkeurigheid in deze meting is de bepalende factor bij de drie verschillende technieken die zijn vergeleken. Uit deze experimenten kan worden afgeleid dat effecten van het niet juist bepalen van de brekingsindex kunnen leiden tot afwijkingen van 50 nm per meter en dat ze proportioneel met de meetlengte toenemen. Bij metingen in vacuüm blijven alleen de hiervoor genoemde periodieke afwijkingen over. Bij de toenemende precisie-eisen zal men daartoe moeten overgaan, ook de lithografieontwikkelingen die later worden toegelicht vragen om een vacuümomgeving.

Oppervlaktemetingen

De onderzoeksactiviteiten binnen TU/e-Precision Engineering zijn steeds gericht geweest op kwantificering van oppervlakken via ruwheids- en vormmeting. Het onderzoek gericht op herleidbare ruwheidsmeting heeft binnen de sectie een lange traditie en loopt via 2D analoge naar 3D digitale ruwheidsmeting met afwijkingenanalyse per parameter. Dit laatste deel, nog lopend onderzoek, heeft als doelstelling de afwijkingenanalyse bij stylusmetingen zover door te voeren dat bij een belangrijke groep van ruwheidsparameters een realistische schatting van de onnauwkeurigheid in de betreffende parameter kan worden uitgevoerd. Hiermee kan herleidbaarheid voor ruwheidsmeting naar de standaard worden gerealiseerd. Het interval van elke afwijkingenbron

dient zorgvuldig te worden bepaald alsmede zijn relatie met de gewenste ruwheidparameter waarna, via variatierekening vanuit alle afwijkingen, een verzameling van virtuele meetuitkomsten wordt gegenereerd waaruit de onnauwkeurigheid van de gewenste parameter wordt geschat. Een sterk complicerende factor is dat de invloed van de afwijkingenbron parameterafhankelijk is (Morel 05). In dit onderzoek wordt de methode ook toegepast bij het meten van ronde vormen en technische profielen zoals bijvoorbeeld schroefdraadprofielen.

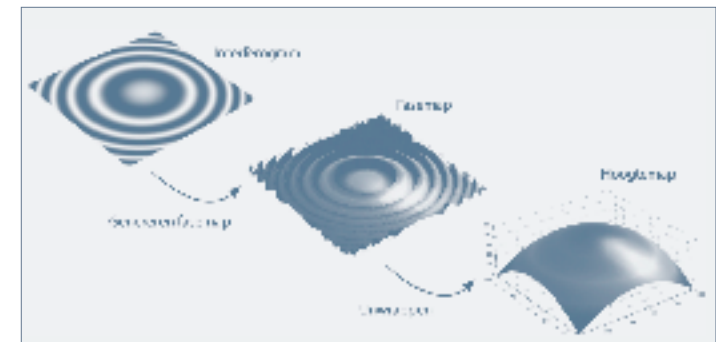
Een belangrijk onderzoek in het gebied is de TU/e-Precision Engineering deelname in het EU project 'Superwafer' dat de doelstelling heeft technologie te ontwikkelen voor het vervaardigen van dubbelzijdig gepolijste silicium wafers van 300 mm en groter. Het totale technologiepakket wordt ontwikkeld door onderzoeksgroepen uit 6 Europese landen. De eigen bijdrage was, om samen met de industriële partner IBS Precision Engineering, meettechnologie te ontwikkelen voor het dubbelzijdig meten van de oppervlaktekwaliteit en de diktevariatie van gefabriceerde wafers. De gewenste meetonnauwkeurigheid was ten hoogste 30 nm voor de vormmetingen bij een productiesnelheid van 60 wafers per uur. Naast de te ontwikkelen meettechnologie moest de haalbaarheid van de doelstellingen worden aangetoond door middel van een prototype meetmachine.

Na het ontwikkelen van toepasbare interferentiële meettechnologie en het uitwerken en analyseren van enige machineconcepten is in het Precision Engineeringlaboratorium een prototype meetmachine ontwikkeld waarmee grote wafers dubbelzijdig kunnen worden gemeten met de gewenste precisie en meetsnelheid. Het prototype is gebaseerd op een dubbelzijdig toegepaste Fizeau interferometer waarmee in stappen in digitale vorm interferogrammen van delen van waferoppervlak worden vastgelegd die later rekentechnisch worden verbonden tot het totale waferoppervlak. In het interferogram vormen de interferentielijnen de lokale 'hoogtelijnen' van het oppervlak dat echter pas eenduidig te reconstrueren is als via meerdere, faseverschoven, interferogrammen per meetpositie de 'fasemap' is bepaald. Uit de lokale fasemap wordt vervolgens de lokale vorm gereconstrueerd. Het schema van dit proces is gegeven in figuur 10, waarbij wordt opgemerkt dat door de toegepaste meettechniek de naastgelegen interferentielijnen een lokaal hoogteverschil representeren van een halve golfengte van het gebruikte laserlicht, dit is 316 nm.

De fasemap kan worden bepaald met een geschatte onnauwkeurigheid van omgerekend 5 nm.

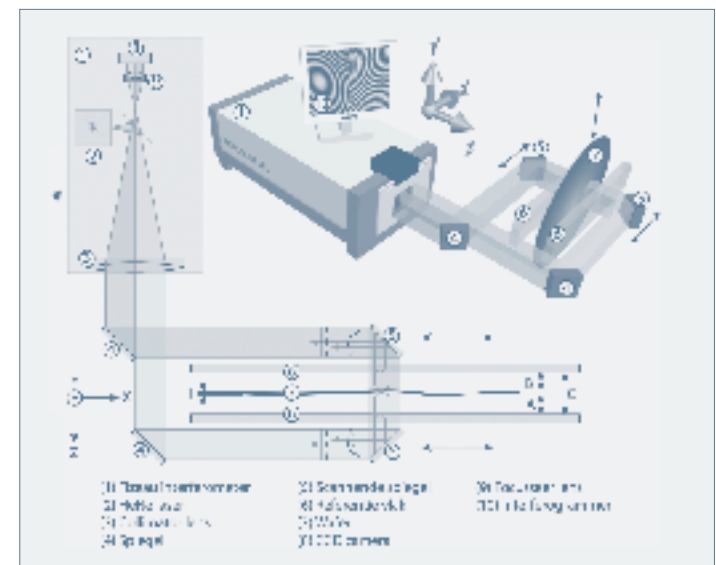
figuur 10

Schema reconstructie oppervlaktevorm uit interferogrammen



figuur 11

Schema van het bovenaanzicht van de wafermeetopstelling



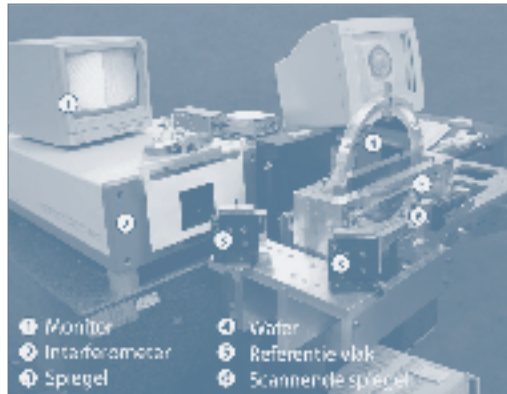


Het bovenaanzicht van de meetopstelling is schematisch weergegeven in figuur 11, waarbij de beide in x-richting verplaatsbare hoekspiegels 5 de interferometerbundels naar de referentiespiegels 6 en het waferoppervlak 7 leiden. De wafer 7 kan in y-richting worden ingesteld waarmee het mogelijk is in stappen de naastgelegen interferogrammen van de beide waferoppervlakken vast te leggen evenals de bijbehorende fasemappen en oppervlaktevormen. Uit de vastgelegde deeloppervlaktevormen wordt met behulp van koppelen, ook 'stitching' genoemd, het totale gemeten oppervlak gereconstrueerd. De deeloppervlakken hebben in de huidige meetopstelling een afmeting van 25 x 45 mm.

Een uitgebreide beschrijving van de ontwikkelde meettechnieken inclusief kalibratie van het instrument en de afwijkingenanalyse is vastgelegd in de dissertatie die begin 2005 beschikbaar komt (Jans 05). Tenslotte is in figuur 12 de meetopstelling afgebeeld zoals die in het onderzoek is ontwikkeld.

figuur 12

Meetopstelling voor het inspecteren van grote wafers



Ontwerpen van precisieapparatuur

Het ontwerpen in de sectie werd toch vooral gestuurd vanuit de behoeften in de verschillende projecten en de mogelijkheid daarin prototypen te realiseren, te testen en te meten op het gewenste niveau. We zijn daar wel steeds uitgegaan van de ontwerpregels en technieken die eerder waren ontwikkeld of die uit andere bronnen, zoals ASPE,

waren verkregen. In de afgelopen jaren is zo een aantal meet- en bewerkingsmachines (VerM 99, VerH 99, Renk 97, Segg 02), gereedschappen voor precisiemachines (Goos 97, Homb 05) en tastsystemen voor precisie-CMM's (Pril 02, Vlie 96, Wetz 98) ontwikkeld. Het ging hier steeds om zeer innovatieve ontwerpconcepten waarbij het, met financiële steun van bedrijven en instellingen, mogelijk was prototypen te ontwikkelen en de gehanteerde ontwerpregels en voorspelde precisie te valideren. Het is in dit kader niet mogelijk de ontwikkelde concepten in hun geheel te bespreken, als voorbeelden zal een tweetal concepten kort worden behandeld.

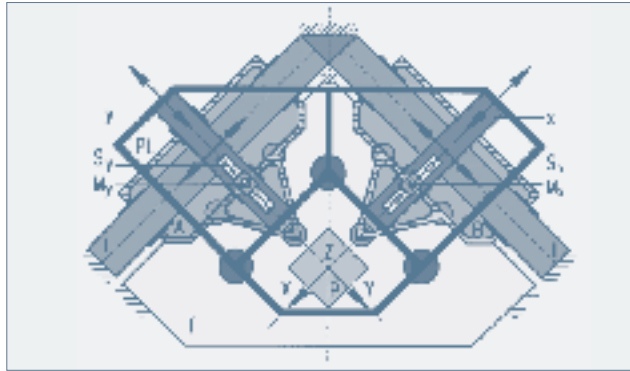
In 1994 was het duidelijk dat onder druk van de toenemende miniaturisatie er behoefte ging komen aan precisie meetapparatuur voor het dimensioneel meten van kleine producten. Ook de nauwkeurigheidseisen namen snel toe. Daarom hebben we besloten, in afstemming met het Nederlands Meetinstituut (NMI) en financieel ondersteund door EZ, een nieuw type meetmachine te ontwikkelen dat aan de gestelde eisen zou kunnen voldoen. Deze machine zou in een meetvolume van 1 dm een volumetrische meetnauwkeurigheid van maximaal 100 nm moeten bereiken, waarbij verschillende soorten tastsystemen toegepast moesten kunnen worden. Uitgaande van de eerder besproken ontwerpregels is een concept ontwikkeld dat er op gericht was zoveel mogelijk de bronnen van afwijkingen te elimineren die in de toenmalige meetmachines voorkwamen. Dat hield het volgende in: in een groot gebied van het meetvolume voldoen aan de principes van Abbe en Bryan, toepassing van kinematische constructies, korte mechanische lussen tussen de meetsystemen en het tastsysteem en een goede materiaalkeuze om de thermomechanische effecten tot het gewenste nm-niveau te kunnen reduceren. Er is gekozen voor de toepassing van lineaire precisie meetsystemen en voorgespannen luchtlagers in de drie asrichtingen en een bewegende z-as. Hierdoor kon niet in het gehele volume aan het Abbeprincipe worden voldaan maar het voordeel was dat het meetobject in deze opzet niet verplaatst hoeft te worden en dat er een optimale vrijheid voor de uitvoering van meettaken werd verkregen. Een bovenaanzicht van het ontwerp is schematisch weergegeven in figuur 13.

Hier is gebruik gemaakt van tussenlichamen waardoor de werklijnen van de x- en y-meetsystemen de z-as snijden en waarmee in het x-y vlak zowel aan het Abbe- als Bryanprincipe is voldaan; voor de beweging

van de z-as lukt dat niet dus is een zeer goede reproduceerbaarheid van de asbeweging nodig met softwarecompensatie van overblijvende afwijkingen.

figuur 13

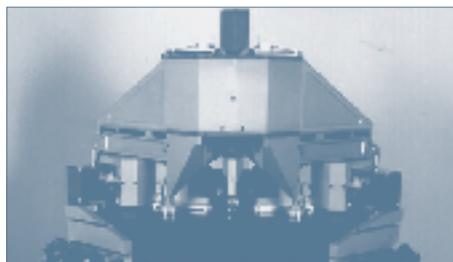
Schematische weergave van het bovenaanzicht (2D) van de meetmachine



Het meetplatform PL, dat het luchtlagersysteem en lineair meetsysteem voor de z-as draagt, kan op deze wijze op het granieten referentievlak van het meetobject worden afgesteund. Voor de aandrijvingen zijn in de drie asrichtingen lineaire motoren toegepast waardoor het mogelijk werd een gunstige ligging voor de aandrijfrichtingen in het horizontale vlak te verkrijgen ten opzichte van het massamiddelpunt van PL. Dit levert dan weer een gunstig mechanisch/dynamisch gedrag op. De machine is via een actief trillingsisolatiesysteem op de laboratoriumvloer afgesteund. Het vooraanzicht van de machine is afgebeeld in figuur 14 (VerM 99).

figuur 14

Vooraanzicht van het prototype 3D precisiemeetmachine



Na een zorgvuldige analyse en de nodige kalibratiemetingen is berekend dat in het meetvolume, na softwarematige compensatie van reproducerende afwijkingen een meetonnauwkeurigheid van 80 nm bereikbaar is mits de effecten van het toe te passen tastsysteem relatief klein zijn. Na de demonstraties heeft een commercieel bedrijf van de eigenaar van dit prototype, het NMI, toestemming gekregen onder voorwaarden en uitgaande van dit concept een commercieel prototype te ontwikkelen. Recent is het werkend prototype gedemonstreerd (ZEIS 04).

Zowel bij de nanomeetmachine die door Ruijl is ontwikkeld als bij de precisie-CMM die hiervoor is besproken kan alleen een optimaal resultaat worden bereikt met een 3D-tastsysteem dat nanometerresolutie levert bij een afwijking in de reproduceerbaarheid van hooguit enkele nm. Ook moet de dynamische meetkracht voldoende laag zijn opdat tijdens het aantastproces geen plastische vervorming van het werkstukoppervlak optreedt. Deze laatste eis stelt strikte voorwaarden aan de effectieve massa van het aantaststelsel en de stijfheid in de aantastrichting terwijl ook de eigenschappen van het werkstukoppervlak van belang zijn (Vliet 1996). Het is verder aan te bevelen deze stijfheid in de drie richtingen zo mogelijk gelijk te houden. Op basis van deze uitgangspunten heeft Pril (Pril 02) een lijst van specificaties opgesteld voor het ontwerp van het gewenste tastsysteem. Na een zorgvuldige analyse van mogelijke concepten is een ontwerp uitgewerkt dat is gebaseerd op een stylusdrager die via drie elastische, en dus vervormbare, balkjes aan de basis van het tastsysteem is bevestigd. De vervorming van de balkjes wordt gemeten met behulp van ingebouwde rekstrookjes die lokaal rek- en drukspanningen registreren. De rekstrookjes zijn per balkje in een elektrische meetschakeling opgenomen, waarmee de resulterende spanningsvariaties, die een maat zijn voor de vervorming van de balkjes, worden gemeten. Met behulp van een rekenmodel zijn daarna de gemeten spanningsvariaties gekoppeld aan de beweging van de styluspunt die uitgevoerd is als meetkogel met een diameter van 0,5 mm. De uiteindelijke stylusafmetingen zijn uitgekomen op een lengte van 8 mm bij een diameter van 0,35 mm, terwijl de balkjes een lengte kregen van ongeveer 1,6 mm bij een breedte van 160 µm en dikte van 20 µm. Vanwege de afmetingen, mede veroorzaakt door de gewenste lage stijfheid van het tastsysteem, bleek de uitvoering van de balkjes

alleen mogelijk in siliciumtechnologie. Toen is besloten de gehele basismeeteenheid uit te voeren in siliciumtechnologie, inclusief de balkjes met ter plaatse aangebrachte piëzo-resistieve rekstrookjes met de benodigde elektronische schakelingen. De stylus is later in een relatief stijve stervormige drager opgenomen waarna het geheel op de silicium meeteenheid is gelijmd. In figuur 15 is het totaal prototype, gemonteerd in een mechanische drager, in een zijaanzicht afgebeeld. Ook is een vergrote opname van een balkje inclusief de sensoren en contactsporen voor de elektrische schakeling weergegeven.

figuur 15

Zijaanzicht van het prototype tastsysteem met detail van een balkje



Hoewel de voorstudie voor het ontwerp grondig was uitgevoerd, evenals de vervaardiging van de basismeeteenheid, was het onbekend of de voorspelde nm-resolutie en -reproduceerbaarheid in de praktijk ook gehaald konden worden. Daarvoor is eerst een kalibratiesysteem ontwikkeld (Pril 02) dat na enige modificaties en eigen kalibraties in staat bleek de gewenste nanometerresolutie en -reproduceerbaarheid te leveren. Opvallend was dat de eerste kalibraties periodieke afwijkingen opleverden die ook door Cosijns gemeten waren en resulteerden uit uitlijnfouten in de interferometrische meetopstelling. De eerste kalibratieresultaten leerden dat in een meetbereik van $4 \mu\text{m}$ weinig hysteresis was waar te nemen. Echter bij kalibraties in x- en y-richting, dit is loodrecht op de stylusas, bleek de verplaatsing groter dan was voorspeld. Na analyse bleek dit te worden veroorzaakt door het rollen van de tastkogel over het contactvlak van de meetopstelling. Na correctie van dit effect bleek de spreiding in de kalibraties beneden 10 nm te liggen.

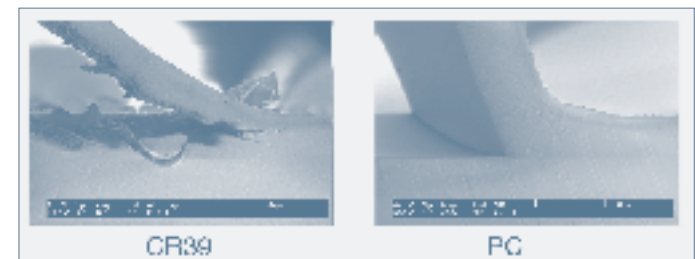
Wel was duidelijk dat de benodigde nm-resolutie aanwezig was. Zoals te verwachten is er veel belangstelling voor het ontwikkelde 3D-tastsysteem, dus is besloten het project voort te zetten, met steun van het IOP-PT, in de richting van automatische assemblage van precisiemicrosystemen (Bos 03). Daarnaast wordt er gewerkt aan industriële toepassing op de eerder besproken precisie meetmachines van Ruijl.

Precisieverspanen van kunststoffen

Door industriële belangstelling voor de fabricage van kunststof producten, met name lenzen, spiegels, contactlenzen en brillenglazen, is er de laatste 10 jaar een aantal projecten uitgevoerd met industriële steun. Uit deze projecten kwamen vragen naar voren betreffende het meten van de optische kwaliteit, het kunststofverspaningsproces, de ontwikkeling van gereedschappen voor het draaien van niet-rotatiesymmetrische producten en de slijtagemechanismen van de diamantgereedschappen. De laatste drie onderwerpen worden nu bewerkt in een IOP-PT project dat met twee promovendi wordt uitgevoerd. Een deel betreft het beschrijven van het verspaningsproces van kunststoffen en de mechanismen voor gereedschapslijtage, in het andere deel worden gereedschappen ontwikkeld voor het bewerken van complexe kunststof producten. Het beschrijven van het verspaningsproces is uiterst gecompliceerd door het gedrag van kunststoffen tijdens dit proces. Een voorbeeld is gegeven in figuur 16 waar de onderbroken beitelsnede is te zien van de verspaning van CR 39 en polycarbonaat, beide materialen zijn in gebruik bij het vervaardigen van optische componenten in kunststoffen. Onder gelijke condities ontstaan totaal verschillende oppervlaktekwaliteiten waarbij ook het slijtagegedrag verschillend is.

figuur 16

Beitelsnede bij het draaien van CR 39 en PC





Een balans voor het tijdvak 1991-2004

Ook het beschrijven van de slijtagemechanismen is lastig omdat meerdere mechanismen een rol spelen. Daarbij is recent duidelijk geworden dat de tribo-elektrische en tribochemische mechanismen dominant zijn. Ook hier spelen de specifieke materiaaleigenschappen een belangrijke rol (Gubb 04).

De ontwikkeling van specifieke gereedschappen, de 'fasttool' systemen waarbij de beitel getransleerd of geroteerd wordt tijdens het proces, loopt al ongeveer 10 jaar. In samenwerking met Philips Research is een systeem ontwikkeld waarbij de beitel over een slag van 1 mm evenwijdig aan de spindelas van de machine wordt bewogen, gekoppeld aan de rotatie van het product (Goos 97). Een ander project in deze samenwerking was gericht op dezelfde toepassing. Daarbij werd echter de spindel behalve van een rotatie ook van een translatiebeweging voorzien (Renk 97). Deze laatste ontwikkeling maakt het mogelijk zeer complexe producten te fabriceren. Een probleem bij de ontwikkeling van deze fasttools is het ontstaan van stoorkrachten die invloed hebben op de oppervlaktekwaliteit van het product en die dus gereduceerd moeten worden. Een oplossing is het gebruik van een roterend gereedschap. Echter, de constructie wordt, mede door de ingebouwde roterende aandrijving, het meetsysteem en de lagering, lastig te realiseren. Toch wordt in dit project een prototype ontwikkeld en getest (Homb 05).

De sectie heeft in de afgelopen periode volgens de afspraken onderwijs verzorgd en onderzoek verricht zoals hiervoor is aangegeven. Dit is in die periode gemiddeld uitgevoerd met 4 fte wp en 4 fte obp inclusief de secretaresse.

Onderwijsbijdragen

Er is onderwijs verzorgd voor de faculteit Werktuigbouwkunde en het SAI, dit laatste betreft de tweedefaseopleiding Mechatronisch ontwerpen. Voor de faculteit Werktuigbouwkunde zijn per jaar gemiddeld 5 colleges verzorgd. Dit komt neer op ongeveer 2600 college-uren, inclusief begeleidde zelfstudie. Voor het SAI zijn in de afgelopen periode gemiddeld 3 colleges verzorgd. Over genoemde periode komt dit uit op ongeveer 800 uur onderwijs. Bij de faculteit Werktuigbouwkunde studeerden in de genoemde periode 150 studenten af. In het SAI zijn door ons 27 afstudeerprojecten in het MeO programma begeleid en geëxamineerd.

Onderzoeksbijdragen en promoties

Het aantal publicaties zoals hier door mij is geregistreerd betreft de publicaties in vaktijdschriften, de 'Journals', en deze geduid als 'conferentiebijdragen' die zijn opgenomen in de 'Conference Proceedings'.

Het totaal aantal gevonden en geregistreerde publicaties op naam van Precision Engineering is 127.

Promoties

In de beschouwde periode zijn door ons 17 promotieprojecten met een promotie afgesloten, nog 6 projecten lopen door, waarvan er naar verwachting 5 in 2005 worden afgesloten en de laatste in 2006. De meeste projecten zijn met financiële steun van bedrijven en instellingen uitgevoerd. De financiële bijdragen kwamen/komen van:

- STW : 4
- EU (Europese gemeenschap) : 4
- EZ (Economische Zaken via NMi en Senter (IOP-PT, BTS, TS) : 6
- Industrie met Philips: 1, ASML/Agilent: 1, Botech: 1, Mitutoyo: 4

Verwachtingen voor de toekomst

Een ruwe schatting leert dat deze financiële ondersteuning een waarde vertegenwoordigt van in totaal meer dan 5 M€. Daarnaast ontving de TU/e nog de gebruikelijke vergoedingen voor de promoties en de SAI diploma's.

Onderzoeksvisitaties

De sectie heeft meegedaan aan twee onderzoeksvisitaties en wel in 1993 en 1999. De beoordelingen waren respectievelijk:
1993: Voldoende tot goed, invulling leerstoel nog niet voltooid
1999: Goed tot uitmuntend.

Organisatie van Internationale Conferenties

De sectie had de eer de '3rd EUSPEN International Conference' in 2002 te mogen organiseren in samenwerking met de regionale en nationale precisie-industrie. Ruim 400 wetenschappers vanuit de gehele wereld hebben gedurende drie dagen in het TU/e Auditorium gerapporteerd over ontwikkelingen in het vakgebied. Op zondag voorafgaande aan het congres waren deelnemers in de gelegenheid zich bij te scholen via tutorials die door specialisten uit EUSPEN werden verzorgd. Gedurende de conferentie was er gelegenheid kennis te nemen van nieuwe industriële ontwikkelingen op een overzichtstentoonstelling die in de hal van het Auditorium was ingericht. Na de conferentie, op donderdag, was er gelegenheid de lokale precisie-industrie te bezoeken. Daarvan werd druk gebruik gemaakt.

Het vakgebied wordt geregeerd door de roadmaps die door specialisten worden ontwikkeld en voorspellen wat er in de verschillende onderdelen gaat gebeuren. Zo zijn er de Intel lithografie roadmap, de internationale halfgeleider roadmap met onderdelen zoals die voor metrologie, er is een microsystemen roadmap en zelfs een nationale precisietechnologie roadmap, deze is door het IOP-PT geïnitieerd. Interessant zijn de huidige lithografieontwikkelingen waar wel de zogenaamde wet van Moore wordt gevolgd, maar dan vanuit een andere aanpak dan bijvoorbeeld voorspeld was in de Intel roadmap. De kritische lijnbreedte in chips komt dit jaar op 90 nm te liggen, deze kan worden gefabriceerd met de thans aanwezige waferstepper van ASML gebaseerd op de ArF laserlichtbron met golflengte van 193 nm. Door toepassing van een dunne waterfilm tussen de belichtingslens en de te belichten wafer wordt de numerieke apertuur verhoogd. Dit kan leiden tot de fabricage van lijnbreedten van ongeveer 50 nm. Deze stap kwam in de bekende roadmap niet voor. Die zou immers via een waferstepper met een F2 laserlichtbron met golflengte van 157 nm vervaardigd gaan worden. Het voordeel is vooral het kostenaspect: de stap naar 157 nm was een lastige en dure vanwege de specifieke eigenschappen van het toe te passen lensmateriaal CaF₂ voor de belichtingslens. Nu is de verwachting dat voor lijnbreedten kleiner dan 50 nm toch moet worden overgegaan naar een belichtingseenheid die gebruik maakt van EUV straling met een golflengte van 13 nm.

figuur 17

Technologie-
ontwikkeling IC
componenten DRAM

technology (nm)	180	150	130	100	70	50	30
DRAM (bit)	1 G	2 G	4 G	16 G	64 G	256 G	512 G
Clock speed (GHz)	0.75	1	1.6	8	5.5	11	18
Year	1999	2000	2001	2003	2006	2010	2013

De waferstepper/scanner heeft hier een andere opbouw waarbij vanuit de speciale lichtbron de genoemde straling wordt geselecteerd en via een eerste set spiegels op het masker wordt afgebeeld. Daarna wordt het maskerbeeld via een tweede set spiegels in de resistlaag op de wafer afgebeeld (Beck 02). Het aantal belichtingsstappen is afhankelijk van de te fabriceren IC, meestal tussen 20 en 40. Hiermee moeten dan DRAM geheugenchips van 256 Gb gemaakt kunnen worden. Een voorbeeld van deze ontwikkeling is gegeven in het schema in figuur 17, eigenlijk geeft dit de wet van Moore weer.

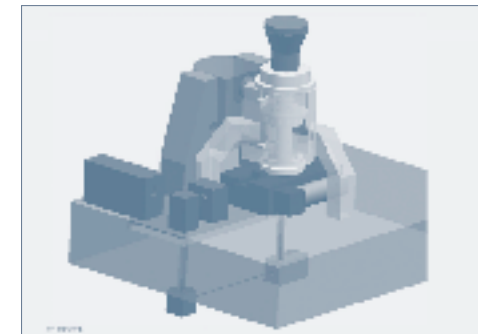
In dit overzicht is ook de 35 nm lijnbreedte aangegeven, op dit moment is nog niet zeker dat die met EUV kan worden vervaardigd, ook vanwege nog te ontwikkelen materialen voor bijvoorbeeld de resist die moet worden toegepast (STT-60 98). Een forse uitdaging voor Precision Engineering is de noodzaak het belichtingsgedeelte in vacuüm te moeten uitvoeren. Een voordeel daarbij is het meten in vacuüm waardoor het interferometriegedeelte een stuk nauwkeuriger kan worden en de gewenste nm nauwkeurigheid echt gehaald kan worden (Cosij 04). Het genoemde belichtingsgedeelte inclusief de lichtbron vraagt de nodige aandacht; dit geldt met name voor het vervaardigen, meten en positioneren van de spiegels in het belichtingssysteem. Alles dient uiteindelijk met nanometerprecisie te worden uitgevoerd bij relatief grote afmetingen. Om alle profijt te hebben van de korte golflengte van de straling dient de numerieke apertuur NA voldoende hoog te worden, deze wordt nu geschat op 0,25 en is dus nu relatief laag. Een enorme uitdaging voor Precision Engineering; we hebben geluk dat we nog even tijd hebben voordat de EUV beschikbaar moet zijn als we de 'Moore-voorspellingen' willen aanhouden.

Het resultaat van de EUV lithografie is o.a. microstructuren die in een aantal gevallen met hoge resolutie en nauwkeurigheid gemeten dienen te worden, zij zijn echter dikwijls zeer slecht toegankelijk voor mechanische en optische sensoren zoals die thans worden toegepast in de nanometrologie. Elektronenmicroscopen hebben daar het voordeel dat de bundel te focuseren is tot enige nm. Deze instrumenten zijn echter niet echt uitgerust voor toegepaste metrologie in het nanometergebied. Toch biedt deze technologie mogelijkheden om deze als sensor te integreren in een 3D-meetmachinestructuur, mede door de ontwikkeling van zeer kleine SEM-kolommen bij Philips

Research/FEI. Deze gedachte moet veel verder worden uitgewerkt daar ook hier de nodige technologische problemen de kop opsteken. De gedachte is om hier zo mogelijk in een aangepaste omgeving te meten, niet in hoogvacuüm, waarbij toch een geringe verstoring van de elektronenbundel nodig is vanwege de gewenste precisie. Vanwege die precisie zal er volgens de ontwerpregels een scheiding moeten komen tussen het meetframe en het krachtenframe, waarbij de elektronenkolom in het meetframe gebracht dient te worden en dus losgekoppeld moet zijn van de hoogvacuüminstallatie. Ook is de insteek zoveel mogelijk aan de ontwerpprincipes te voldoen zoals die eerder zijn besproken, dus de drie meetassen dienen door het focuspunt van de elektronenbundel te gaan. De uitvoering van een dergelijke machine is nog niet geheel duidelijk, ook het werkelijk in 3D meten aan microproducten is nog niet opgelost. Een 'artists impression' voor een dergelijke meetmachine is zonder verder commentaar afgebeeld in figuur 18.

figuur 18

Impressie van een opzet voor een 3D nano-CMM met E-beam sensor. (Tekening Philips Research)



De ontwikkelingen in dataopslag manifesteren zich aan een kant via de geheugenchips, leuk verpakt en voorzien van een USB-connector, die al een opslagruimte tot 1 GB of meer levert, en aan de andere kant de 'optical recording' die ook een snelle ontwikkeling doormaakt. Dit laatste is begonnen met de bekende CD met spoorafstand van 1,6 μm en een opslagruimte van 700 MB, via de DVD met respectievelijk 0,7 μm en 4,7 GB nu naar de komende 'Blue Ray' systemen met een spoorafstand van 0,2 μm en een opslagcapaciteit van 25 GB op het CD formaat. Dit betekent dat met 2,5 GB per speelfilm er al 10 films vast te leggen zijn



Dankbetuiging

met het Blue Ray systeem. Dit allemaal voor enkellaagssystemen, met een dubbellaagssysteem kan dus nog aanzienlijk meer beeldmateriaal worden vastgelegd!

Dit lijkt voorlopig genoeg voor de individuele gebruiker maar voor commerciële toepassingen kan mogelijk in de toekomst, via E-beam masterrecording, nog een flinke stap gemaakt worden. Zoals al is gemeld kan de SEM bundel gefocusseerd worden tot een tiental nm en is reeds bewezen (Rose 04) dat het mogelijk is in met E-beam in resist spoortjes te maken van 25-50 nm. Dit levert op een schijfje van 12 cm ongeveer 150 GB aan opslagcapaciteit op, dat zijn 60 speelfilms van een redelijke kwaliteit of de helft van topkwaliteit. Voor de individuele gebruiker zijn er nog de nodige problemen als het uitlezen van de schijfjes, mogelijk kan dat met een aangepaste AFM naald. Een probleem bij het vervaardigen van dit soort masterschijven is de tijdsduur. Een schatting, uitgaande van een testopstelling, leert dat de vervaardiging van een masterschijf ongeveer 1,5 uur kost. Aangezien de spoorafstand enige tientallen nm zal zijn, is er een zeer stabiele precisiemachine noodzakelijk. Het is zeker niet onmogelijk deze te ontwikkelen, gezien de ontwikkelingen van de laatste jaren. Weer een mooie uitdaging voor Precision Engineering.

Tenslotte nog een paar opmerkingen over de ontwikkeling van precisieapparatuur voor het meten en bewerken van precisie-micro-producten. De top-down beweging zoals die is veroorzaakt door de miniaturisatietrend vraagt in toenemende mate om specifieke precisieapparatuur, inclusief het kunnen hanteren en waarnemen van de producten en processen. De ontwikkeling van de apparatuur is pas redelijk recent opgestart en lijkt achter te lopen bij de vraag naar dit soort machines en instrumenten. Het zou verstandig zijn als enige gespecialiseerde onderzoeksgroepen op universiteiten en industrie zich meer op deze ontwikkelingen zouden richten, zodat met name zuidoost-Nederland zijn erkende rol als ontwikkelaar van precisie-apparatuur ook in de toekomst kan waarmaken. Helaas lijkt er, met name op de technische universiteiten, weinig neiging die weg te gaan, wat ingaat tegen de wens van de overheid op redelijk korte termijn een kenniseconomie te realiseren. Mogelijk is een goede samenwerking met enige bekende Duitse universiteiten hier een optie.

Geachte aanwezigen,

Dit was het einde van mijn afscheidsrede die ging over Precision Engineering, het vak dat ik op alle niveaus heb beoefend gedurende meer dan 40 jaar.

Aan zo'n eind is het gebruikelijk woorden van dank uit te spreken en ik wil dan beginnen het College van Bestuur van deze universiteit te danken voor mijn aanstelling indertijd, na mijn opleiding en werkzaamheden bij Philips Research. Ook dank ik de faculteit Werktuigbouwkunde waar ik mijn opleiding en werkzaamheden begon en uiteindelijk ook afsloot. De faculteit heeft mij de ruimte gegeven om naast het werk te studeren, wat mijn uitdrukkelijke wens was bij mijn aanstelling. Ik dank hier vooral professor Koning die mij inleidde in alle aspecten van het vak Dimensionele metrologie en die mij in die periode kennis liet maken met alle topinstituten en industriële laboratoria in de wereld. Hij spoorde me aan te promoveren. Dit vond plaats nadat hij al afscheid had moeten nemen vanwege familieomstandigheden. Ik mocht in die tijd de sectie leiden onder verantwoordelijkheid van professor Van der Wolf die mij de vrijheid bood het vakgebied verder te ontwikkelen, ook met studenten en promovendi, waarvoor hartelijk dank.

Eind 1990 volgde de aanbieding de leerstoel Precision Engineering op te zetten binnen de vakgroep WPA en ik dank de toenmalige collega's Van der Wolf, Rooda en Kals voor de opvang en de steun in die beginperiode. Snel toonden er veel studenten interesse in het vakgebied, ook aan hen dank voor het vertrouwen en hun inzet voor Precision Engineering. Daarnaast kreeg ik van het SAI het verzoek om samen met collega Vandeput de opleiding MeO op te zetten, dus dank aan het SAI voor het vertrouwen. Veel dank ben ik verschuldigd aan mijn uiterst loyale collega Vandeput voor zijn inzet en hulp bij deze niet eenvoudige klus. Meer dan 70 ontwerpers uit diverse landen hebben we samen met het onderwijsteam opgeleid en daar mogen we best trots op zijn. Een speciaal woord van dank komt toe aan het relatief grote aantal promovendi dat koos voor Precision Engineering om daar promotieonderzoek uit te voeren. Mede door hun inzet en loyale bijdragen aan onderwijs en onderzoek in de sectie zijn bijna alle



promoties een succes geworden. Dit succes was mede te danken aan de financiële en technische ondersteuning van STW, EZ-Senter (IOP, BTS, TS), EU-Brussel en de industrie, met name Philips Research, HP/Agilent, ASML en Botech.

Een bijzonder woord van dank moet ik hier uitspreken voor de financiële en technische ondersteuning van delen van ons onderzoek door Mitutoyo Nederland en Mitutoyo Corporation. Vanaf 1987 heeft deze firma ons onderzoek in de Dimensionele metrologie ondersteund via vier volledig gefinancierde promotieonderzoeken en daarnaast door de levering van precisieapparatuur die ook is ingezet in andere onderzoeksprojecten.

Ook dank ik mijn collega's in de faculteit voor de samenwerking in allerlei gremia als vakgroep, divisie, OCW, faculteitsbestuur, onderzoeksprojecten en bij de ondersteuning van afstudeer- en promotiecommissies.

Mijn collega's in Delft en Twente dank ik voor de samenwerking in de onderzoeksschool IPV, het IOP-PT en IOP-ICPR en de internationale organisaties CIRP en EUSPEN.

Een speciaal woord van dank gaat naar de wetenschappelijke en technische medewerkers van de sectie Precision Engineering die allen op hun manier bijgedragen hebben aan de successen van de sectie die ik eerder heb aangegeven. Dus ben ik veel dank verschuldigd aan Han, Frank, Nick, Erik, Piet, Eef, Willie en de voormalige stafleden Klaas, Harrie, Adriaan, Frits en secretaresse Mies. Een speciale plaats ruim ik in voor het dankwoord aan mijn geweldige secretaresse Greet die mij vanaf het begin zeer veel werk uit handen nam en daarnaast functioneerde als mijn extra geheugen waarvan de info altijd weer terug te vinden was in haar computersysteem. Waarschijnlijk deed zij veel meer dan in haar functieomschrijving stond maar zij deed dat prima en gaf mij daarmee de ruimte om andere dingen te doen die meestal het belang van de sectie dienden.

Tot slot van deze lange reeks dank ik mijn naaste familie, met name Jenny en Sjef en Lonkeke en Erik voor hun steun en belangstelling en 'last but not least' mijn vrouw Marianne die mij steeds de gelegenheid heeft gegeven mijn hobby Precision Engineering uit te voeren zoals ik dat wilde. Ik ben blij dat nu de tijd komt dat ik haar kan ondersteunen bij haar prachtige hobby, de schilderkunst.

Dames en heren, ik dank u voor uw aandacht.

Literatuur

GUM 95

Guide to the expression of uncertainty in measurement
ISO 1995 Switzerland ISBN 92-67-101889

Wetz 98

Laser based displacement calibration with nanometer accuracy
S. Wetzels proefschrift TUE 1998 ISBN 90-386-0730-X

Cosij 04

Displacement laser interferometry with subnanometer uncertainty
S. Cosijns proefschrift TUE 2004 ISBN 90-386-2656-8

Sche 86

Absolute meetnauwkeurigheid van technische laserinterferometers
P. Schellekens proefschrift TUE 1986

Heid 98

Digital linear and angular metrology Robert Franks 1998 Verlag
Moderne Industrie D-86895 Landsberg/Lech Germany

Doeb 04

Measurement Systems: application and design E. Doebelin 5th edition
2004 McGrawHill ISBN 0-07-243886-X

Jans 05

Development of a wafer geometry measuring system M. Jansen
proefschrift TU/e 2005

FanY 98

Stitching interferometry for accurate measurement of curved surfaces
Yu Jian Fan proefschrift TUE 1998 ISBN 90-386-0660-5

Beck 02

Metrology: basic technology for ultra precise optics

K. Beckstette 180 PTB seminar Braunschweig December 18 2002

Ruijl 01

Ultra precision coördinate measuring machine
T. Ruijl proefschrift TUD 2001 ISBN 90-6464-287-7

Pegg 99

Design for a compact high accuracy CMM G. Peggs, A. Lewis, S. Oldfield
CIRP Annals, 48/1, 1999

Teag 97

Basic concepts for precision instrument design C. Teague NIST Tutorial
notes ASPE Annual meeting 1997 Norfolk Virginia USA

VerM 99

High precision 3D coördinate measuring machine M. Vermeulen
proefontwerp TUE 1999 ISBN 90-386-2631-2

VerH 99

Ceramic optical diamond turning machine J. Vermeulen proefontwerp
TUE 1999 ISBN 90-5282-954-3

Weck 04

Probing systems in dimensional metrology A, Weckenmann et.al. CIRP
Annals Vol 53/2 2004

Mich 27

Studies in optics A. Michelson Phoenix Science series, 4th edition 1968
The University of Chicago Press

Sloc 92

Precision machine design A. Slocum ISBN 0-13-690918-3 1992 Prentice
Hall New Jersey USA

Smit 92

Foundations of ultraprecision mechanism design S. Smith and D.
Chetwynd ISBN 2-88124-840-3 1992 Gordon and Breach Science
publishers UK

**Tani 96**

Nanotechnology N. Taniguchi et.al. 1996 ISBN 0-19-8562837 Oxford University Press New York

Tani 83

Current status and future trends of ultraprecision precision machining and ultrafine materials processing CIRP Annals Vol 32/2 1983

Sche 98

Design for precision: current status and trends P. Schellekens et.al CIRP Annals Vol 47/2 1998

Evan 89

Precision Engineering:an Evolutionary View C. Evans ISBN 1-871315-01-8 Cranfield Press UK

Masu 00

State of the art on micromachining T. Masuzawa CIRP Annals Vol 49/2 2000

Eusp 02

Proceedings of the 3rd International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology May 26th-30th 2002 Eindhoven The Netherlands

Brus 00

Assembly of microsystems H. van Brussel et.al. CIRP Annals Vol 49/2 2000

Byrn 03

Advanced Cutting Technology G. Byrne et.al. CIRP Annals Vol. 52/2 2003

Alti 02

Micro Engineering L. Alting et.al. CIRP Annals Vol 52/2 2003

Evan 00

Structured, textured or engineered surfaces C. Evans and J. Bryan CIRP Annals Vol. 48/2 1999

Corb 00

Nanotechnology: International developments and emerging products J. Corbett et.al. CIRP Annals 49/2 2000

Pril 02

Development of high precision mechanical probes for CMM's W. Pril proefschrift TUE 2002 ISBN 90-386-2654-1

Teeu 89

Performance evaluation and a quality control system for CMM's J. Teeuwsen proefschrift TUE 1989

Vlie 96

Development of a fast mechanical probe for CMM's W. van Vliet proefschrift TUE 1996 ISBN 90-386-0168-9

Theu 91

Enhancement of machine tool accuracy: theory and implementation F. Theuws proefschrift TUE 1991

Soon 93

Accuracy analysis of multi-axis machines J. Soons proefschrift TUE 1993

Spaa 95

Software error compensation of machine tools H. Spaan proefschrift TUE 1995

Week 96

Compensation of dynamic errors of coördinate measuring machines W. Weekers proefschrift TUE 1996 ISBN 90-386-0178-6

Flor 02

Accuracy analysis of multi-axis machines by 3D length measurements G. Florussen proefschrift TUE 2002 ISBN 90-386-2943-5

D'Hoo 00

Geometric calibration of CMM's using 3D length measurements F. D'Hooge et.al Proceedings of the IMEKO 2000 Vienna Austria

**Knar 03**

Application of optical fibres in precision heterodyne laserinterferometry
B. Knarren proefschrift TUE 2003 ISBN 90-386-3044-1

Renk 97

Design of an axially controlled spindle unit for high precision turning
M. Renkens proefontwerp TUE 1997 ISBN 90-74445-35-7

Goos 97

Design of a long range tool servo H. Goossens MeO mastersthesis SAI
TUE 1997 ISBN 90-5282-785-0

Segg 02

Design of a CMM for measuring small products in array setups
J. van Seggelen afstudeerverslag TUE-PE nr PE 2002-074

Gubb 04

Diamond tool wear when cutting amorphous polymers G. Gubbels et.al.
CIRP Annals Vol 53/1 2004

Hou 92

Investigation and compensation of the nonlinearity of heterodyne inter-
ferometers W. Hou and G. Wilkening Precision Engineering, (14), 1992

Bos 02

Automatische assemblage van microsystemen IOP-PT project van
TUE-PE met TNO-I opgestart in 2003 Promovendus: E. Bos

Homb 05

Ontwikkeling van een lange slag roterend 'fasttool' bewerkingsysteem
Promotieonderzoek TUE-W, promovendus F. Homburg

Roset 04

Experimental and theoretical characterisation of an experimental elektron
beam recorder. N. Roset afstudeerverslag TUE-PE nr PE 2004-138

Nanot 98

Nanotechnology: Towards a molecular construction kit
A. ten Wolde et.al. STT 60 1998 ISBN 90-804496-1-X

Websites**CIRP**

www.CIRP.net

Zeiss

www.Zeiss.de

ASPE

www.aspe.net

Euspen

www.euspen.org

JSPE

www.jspe.or.jp

Curriculum Vitae



Prof.dr.ir. P.H.J. Schellekens heeft zijn werkzaamheden als hoogleraar Precision Engineering aan de Technische Universiteit Eindhoven per 1 augustus 2004 formeel beëindigd.

Na zijn technische opleiding bij Philips was Piet Schellekens (Best 1941) enige jaren werkzaam als instrumentmaker bij het toenmalige Philips Natuurkundig Laboratorium in Eindhoven. In het najaar 1964 trad hij in dienst bij de Technische Universiteit Eindhoven als technisch assistent onderwijs en onderzoek bij de faculteit Werktuigbouwkunde, vakgroep Productietechnologie. In 1968 verplaatste hij zijn werkzaamheden binnen de vakgroep naar de sectie Geometrische Meettechnieken, onder leiding van prof.drs. J. Koning.

In 1972 startte hij, in parttime, de opleiding Technische Natuurkunde die hij begin 1978 met het predikaat 'met lof' afsloot. Na enige jaren als Universitair docent onderwijs- en onderzoekstaken te hebben uitgevoerd bij genoemde sectie werd besloten het onderzoek te richten op een promotie die in 1986 succesvol werd afgesloten met een proefschrift getiteld 'Absolute meetnauwkeurigheid van technische laserinterferometers'.

Na het afscheid van prof. Koning in 1983 werd hij hoofd van de sectie Geometrische Meettechnieken onder de leerstoel 'Verspaningstechnologie' van prof. Van der Wolf. Als Universitair hoofddocent leidde hij de sectie vanaf 1986 en begeleidde hij diverse afstudeerprojecten en enige promotieprojecten. Daarnaast was hij 12 jaar parttime docent bij de Hogeschool Eindhoven.

Einde 1990 kreeg hij van de faculteit Werktuigbouwkunde de aanbieding de nieuwe leerstoel 'Precision Engineering' op te zetten. Per 1 mei 1991 werd hij benoemd als voltijd hoogleraar.

Piet Schellekens begeleidde ongeveer 150 eigen afstudeerprojecten, 20 mechatronisch-ontwerpersprojecten en voltooide tot nu 17 eigen promotieprojecten. Daarnaast was hij auteur of medeauteur van vele tientallen publicaties, is hij adviseur van enige bedrijven en van het ministerie van EZ en bestuurslid van diverse nationale en internationale commissies gerelateerd aan het vakgebied Precision Engineering.

Colofon

Productie:
Communicatie Service Centrum TU/e

Fotografie cover:
Rob Stork, Eindhoven

Ontwerp:
Plaza ontwerpers, Eindhoven

Druk:
Drukkerij Lecturis, Eindhoven

ISBN: 90-386-1373-3

Digitale versie:
www.tue.nl/bib/