

# Precisiemeten:

*Meten is weten, het is een overbekende waarheid. Maar hoezo weten? Iedere meting is behept met onzekerheid, dus meten is beslist geen zeker weten. En hoe meet je vandaag de dag de dimensies waaraan toleranties zijn gekoppeld in nanometers, veelvoudens dus van een miljardste deel van een meter? Die laatste is niet meer gedefinieerd als een tienmiljoenste deel van een aardkwadrant, noch als de standaardmeter in Parijs, waarvan Jean Henri van Swinden lang geleden een kopie voor ons land veroverde. Heden ten dage zijn onze grondeenheden afgeleid van natuurlijke grootheden, afgezien van de kilogram, die nog steeds als afgeleide standaard in het Delftse Van Swinden Laboratorium slaapt. In dat laboratorium van het Nederlands Meetinstituut werd op 13 oktober het symposium "Precisiemeten, tastend of contactloos?" gehouden. Het trillingsvrije gebouw bood een gastvrij onderdak aan wakkere sprekers en toehoorders met een gemeenschappelijke interesse in geometrische precisiemeettechniek.*

• Frans Zuurveen •

**K**arin Mous van organisator Mikrocentrum opent het symposium en na het welkom staat dagvoorzitter Piet Schellekens, emeritus hoogleraar Precision Engineering aan de Technische Universiteit Eindhoven, stil bij de overgang in de meettechniek van micro- naar nanometers. Hij stelt vast: gemakkelijker gezegd dan gedaan. Die overgang hangt samen met de voortschrijdende miniaturisering en het opvoeren van nauwkeurigheden. Daarbij gaat het om ontwikkelingen in meetmachines, om het opvoeren van precisie tot in het nanometergebied en om steeds betere methodes en procedures om in dat gebied door te dringen. Het is verheugend dat producenten en onderzoeksinstituten elkaar weten te vinden, zoals blijkt uit de Zeiss F25, een meet-

machine voor kleine objecten, die mede is gebaseerd op onderzoek aan de TU Eindhoven.

## Meetstandaarden

Ed van Leer, wetenschappelijk directeur van het NMI Van Swinden Laboratorium (VSL) gaat in op de historie van lengtestandaarden, beginnend met het werk van de naamgever. Inmiddels is de definitie van de meter gebaseerd op tijdmeting met de lichtsnelheid als constante en maakt het laboratorium deel uit van een mondiale meetinfrastructuur waarin erkende kalibratie-instituten samenwerken. Bindende factoren zijn wetten en regelgeving, gevalideerde meetmethoden en de herleidbaarheid naar het SI-systeem.

# tastend of contactloos?

De taakverdeling in Nederland is dat de Metre Convention valt onder het ministerie van Economische Zaken en dat het NMI VSL is aangewezen als de uitvoerder van het nationale meetstandaardenprogramma. De Metre Convention is opgericht in 1875 en omvat onder meer instituties als de General Conference on Weights and Measures CGPM en het International Committee on Weights and Measures CIPM. Bij de kalibratie van meetstandaarden is steeds de herleidbaarheid van het grootste belang: iedere meting moet altijd via een aantal stappen in een ononderbroken keten zijn terug te voeren op de oerstandaard, bij massa (nu nog) de standaardkilogram in Parijs. De lengte-oerstandaard is, zoals gezegd, gebaseerd op de tijd, die op het ogenblik met een nauwkeurigheid van  $10^{-14}$  in seconden meetbaar is.



Afbeelding 1. Een Zeiss UC 550 coördinatenmeetmachine is het 'werkpaard' van het NMI VSL.



Afbeelding 2. De coördinatenmeetmachine Zeiss F25 is ontworpen voor het meten van kleine producten.

Internationaal erkende kalibratie-instituten bewijzen hun competentie in zogeheten key comparisons van hun standaarden. Van Leer illustreert de gang van zaken hierbij aan de hand van een key comparison van kilogramstandaarden. Aan het eind van zijn voordracht laat hij de herleidbaarheidspiramide zien. Die verloopt vanaf de top met de SI-definitie via primaire realisaties, primaire en secundaire standaarden, geaccrediteerde laboratoria en werkstandaarden tot de meetinstrumenten en -standaarden voor dagelijks gebruik aan de basis. Dat is weer bekend terrein, want voor lengtemeting gaat het dan om een set precisie-eindmaten in de meetkamer.

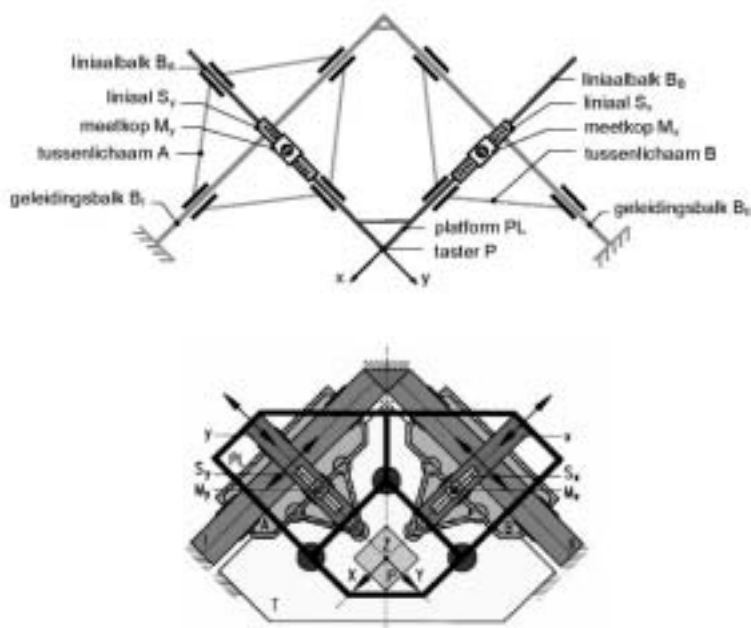
## Kleine producten

Voor het meten van zeer kleine werkstukken in micromechanische productieprocessen zijn traditionele coördinatenmeetmachines ongeschikt. Mauricio de Campos Porath,

## GEOMETRISCHE PRECISIEMEETTECHNIEK

onderzoekingenieur van Carl Zeiss Industrielle Messtechnik in Oberkochen, legt uit dat de meetmachine F25 van Zeiss (zie Afbeelding 2), die is ontwikkeld in een samenwerkingsproject van de groep van Piet Schellekens met het NMI VSL, daarvoor wel geschikt is. Bij de voortschrijdende miniaturisering van onderdelen is steeds vaker de meetbaarheid het probleem, en minder de maakbaarheid: "If we can measure it, we can make it."

Een CNC-coördinatenmeetmachine is een combinatie van kinematica, tastsysteem, besturing en software. In de F25 beantwoordt de kinematica voor de x- en y-richting – volgens TUE-ontwerp – bijna exact aan het comparatorprincipe van Abbe: maatschaal en te meten dimensie liggen in elkaars verlengde; zie Afbeelding 3. Het mechanisme is uitgevoerd met luchtflagers, lineaire aandrijving en zerodurschaalverdeling met een geïnterpoleerde resolutie van 7,8 nm. Het tastsysteem, met een kleinste kogeldiameter van 120 µm en een tastkracht van 0,5 mN, werkt met piëzo-elektrische elementen in een brugschakeling. Verstemen van die schakeling levert het tastsignaal. De contactloze 'aftasting' in de F25 werkt optisch door middel van 2D-beeldherkenning, en deze is geïntegreerd in de Calypso-metsoftware. Het besturingssysteem Zeiss C99 werkt samen met alle bestaande softwarepakketten van Zeiss: behalve Calypso ook HoloS (meten van vrije vormen) en Gear (meten van vertandingen).



Afbeelding 3. Het principe van de xy-bewegingen in de F25, dat beantwoordt aan het comparatorprincipe van Abbe.

Het resultaat van de gezamenlijke inspanningen van TU/e, NMI VSL en Zeiss is momenteel een totale meetonzekerheid van  $0,25 + L/666$  µm ( $L$  de meetlengte in mm) bij aftasten en  $0,5 + L/666$  µm bij contactloos meten, beide binnen een meetvolume van 100 bij 100 bij 100 mm. Er wordt naar gestreefd de meetonzekerheid nog verder te verlagen. Een voorbeeld van de toepassing van Calypso is het meten van een horlogegrondplaat met boringen van niet meer dan 0,34 mm bij een tolerantie van  $\pm 2$  µm.

### Rondleiding

Tijdens een rondleiding in de geconditioneerde en trillingsvrije ruimten van het Van Swinden Laboratorium wordt de Zeiss F25 gedemonstreerd. Op een lcd-scherm is een schijnbaar normaal werkstuk zichtbaar, maar de mededeling dat het gaat om een vijftig maal vergroot beeld, maakt duidelijk dat het werkstuk uiterst klein is. Het wordt dan ook afgetast met een kogel van 300 µm doorsnede.

Ook staat er een opstelling voor het kalibreren van een sensor met een onvoorstelbaar hoge resolutie van 0,1 nm. De meetuitkomst berust op de frequentieverandering van een laser in een holte met veranderende dimensie. Voorts is te zien hoe de grondeenheden zijn geëvolueerd van de X-vormige platina-iridiumstandaardmeter via de golflengte van de ontlading in kryptonisotoop 86 en de jodiumgestabiliseerde neon-heliumlaser naar de definitie van de seconde.

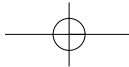
Spectaculair is de meetbank met een lengte van 20 m, in de toekomst uit te breiden tot 50 m. De bank wordt onder meer gebruikt voor het routinematig testen van waterpasbakens voor het 'uitpeilen' van de Nederlandse bodem.

### Contactloos meten

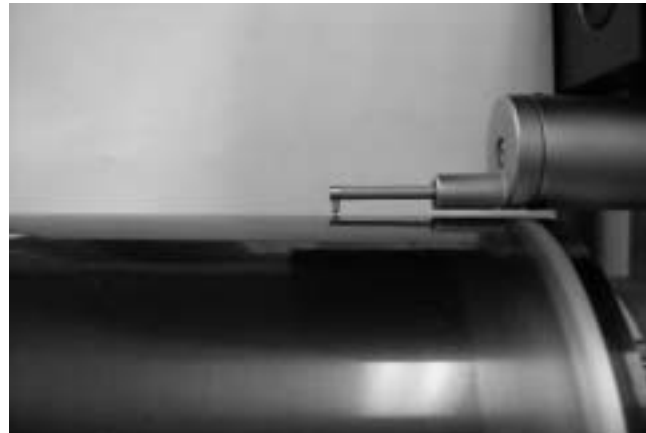
Meten zonder contact is niet nieuw, wel als dat gebeurt met nanometerresolutie. Hans Ott van IBS Precision Engineering vertelt dat de capacitieve en inductieve opnemers van Lion Precision (zie Afbeelding 4) dat mogelijk maken. IBS maakt speciale meetmachines, zoals de ISARA (zie Mikroniek nr. 2 van dit jaar), vertegenwoordigt behalve Lion Precision ook New Way met poreuze luchtflagers, en is gespecialiseerd in de kalibratie van gereedschapsmachines met laserinterferometrie-nauwkeurigheid.

Voordelen van capacitief en inductief contactloos meten zijn de hoge bandbreedte, de hoge resolutie, het ontbreken van warmteontwikkeling ter plaatse van het meetpunt, de hoge lineariteit en de geschiktheid voor toepassing in vacuüm. Eis is wel dat het te meten oppervlak elektrisch geleidend is. IBS kan samen met Lion Precision klantgerichte oplossingen vinden voor moeilijke meetproblemen.

Voorbeelden van probleemoplossingen met capacitieve



Afbeelding 4. Diverse capacitieve en inductieve contactloze opnemers van Lion Precision.



Afbeelding 5. Een ruwheidstaster van Mitutoyo in detail.

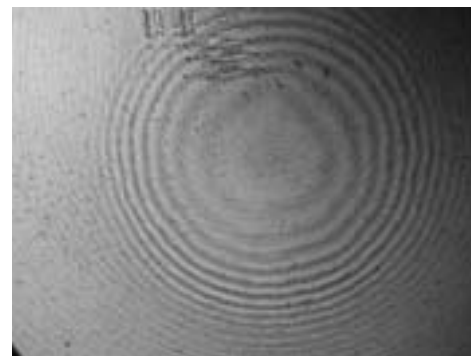
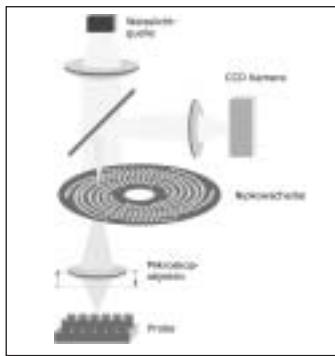
opnemers zijn teruggekoppelde verplaatsingsmetingen van ic's in vacuüm, het differentiaalmeten van remschijfdikten en het meten van asposities in een servosysteem van een magnetisch lager. Bij inductief meten moet er een correctie plaatsvinden voor het materiaal en de resolutie is minder hoog dan bij capacitief meten. Een voorbeeld van inductief meten is het detecteren van de aanwezigheid van schroefdraad en het meten van de spoed door het tellen van het aantal gangen per lengte-eenheid. Een vergelijking van capacitief en inductief meten laat zien dat de maximale resolutie respectievelijk 0,4 en 20 nm bedraagt en de maximale bandbreedte respectievelijk 20 en 80 kHz.

### Ruwheidsmeting

Mitutoyo Nederland heeft sinds kort de beschikking over een Research Center in Best. Han Haitjema, directeur van dat onderzoekscentrum, zet de gebruikelijke ruwheidsmeting met taster (zie Afbeelding 5) tegenover contactloze meetmethoden met behulp van interferentie, met een confocaal sys-

teem of met optische puntsensoren (zie Afbeelding 6). Ruwheidsmeting met taster heeft het voordeel dat die volledig is genormaliseerd en dat de bandbreedte hoog is, maar nadelen zijn dat het werkstuk kan beschadigen, dat meerdimensionale metingen zeer tijdrovend zijn en dat de tasterdiameter het meetresultaat beïnvloedt.

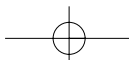
Interferometrische systemen werken met monochromatisch of met wit licht. In het eerste geval wordt direct een soort hoogtkaart van het oppervlak verkregen met circa 0,3  $\mu\text{m}$  hoogteverschil per opvolgende lijn. Met wit licht is er slechts één bruikbare hoogtelijn en moet de opname worden herhaald in hoogtestappen van circa 0,1  $\mu\text{m}$ . Bij confocale systemen wordt het oppervlak in een microscoop met een schijf van Nipkow afgetast, waarbij het focusvlak van het objectief de hoogterefereentie vormt. Daarnaast bestaan er drie verschillende systemen voor optische puntsensoren met ieder hun specifieke eigenschappen: triangulatie, focusfout/confocaal en achromatisch met spectrometer.



Afbeelding 6. Contactloze ruwheidsmeting:

a) interferometrisch met monochromatisch licht; b) confocaal;

c) interferometrisch met wit licht.

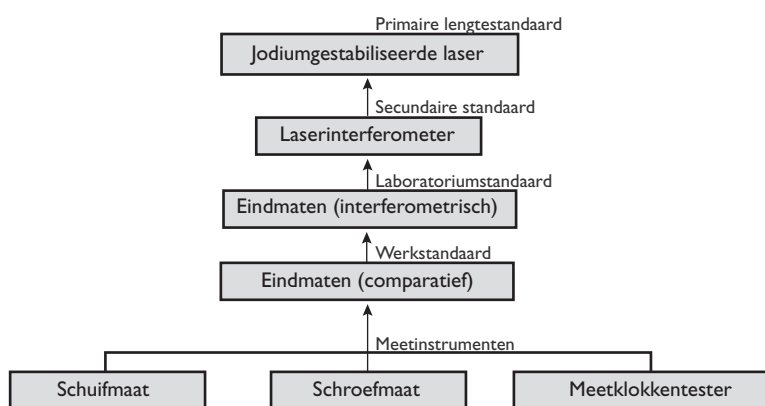


## GEOMETRISCHE PRECISIEMEETTECHNIEK

Voor routine-ruwheidsmetingen is en blijft de tastermethode – met bovengenoemde beperkingen – favoriet. De optische methoden lenen zich beter voor researchdoeleinden en komen vooral in aanmerking als meerdimensionale informatie nodig is. Want bij een klassieke tastermeting is tweedimensionaal meten een uiterst tijdrovende aangelegenheid. Men moet bij optische ruwheidsmetingen steeds alert zijn op artefacten (tot 10%) die inherent zijn aan de methode. Die artefacten ontstaan door faseverschillen bij materiaalovergangen en coatings, onverwachte reflecties bij ruwheden groter dan de laterale resolutie van het systeem, en bij steile stappen en diepe groeven in het oppervlak. Conclusie: elke methode heeft zijn eigen beperkingen en sterke punten. Vanwege de karakteristieke fysische principes, zo besluit Han Haijtjema, is een meting nooit echt ‘fout’, maar ziet men wellicht wat anders dan men hoopt te meten.

### Meetonzekerheid beheersen

Mooie meetmachines maken is één ding, hun meetonzekerheid begrijpen en beheersen is iets anders. Frans-Peter d’Hooghe, hoofd kalibratiedienst van Mitutoyo Nederland (geaccrediteerd door de RvA, de Raad voor Accreditatie) vertelt dat het begrip meetonzekerheid is gedefinieerd in onder meer ISO 17025: “...rekening moet worden gehouden met alle componenten van de onzekerheid die in de kalibratiesituatie van belang zijn.” Zoals Ed van Leer van het NMI al opmerkte, is ook hier de herleidbaarheidsketen van groot belang: van jodiumgestabiliseerde laser via eindmaten naar schuifmaat, schroefmaat of meetklokkentester; zie Afbeelding 7.

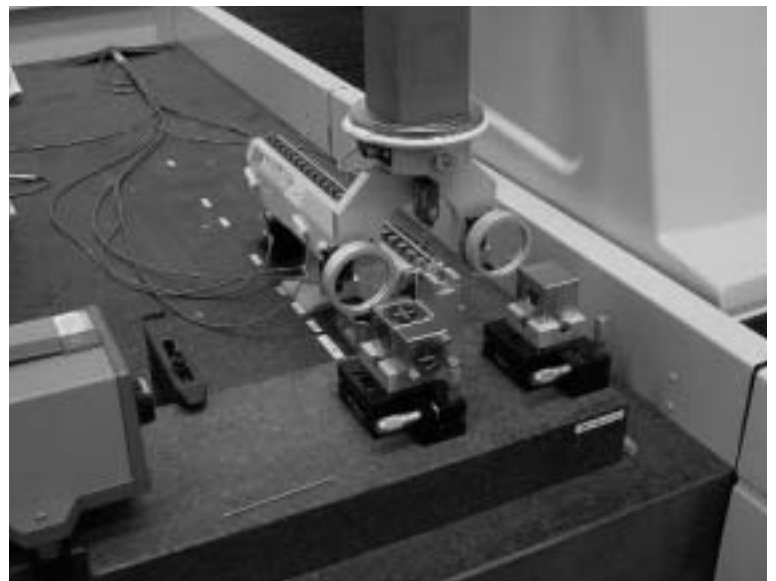


Afbeelding 7. De herleidbaarheidsketen.

De meetonzekerheid van een te kalibreren object is via een onzekerheidsbudget onder te verdelen in een aantal componenten: de gebruikte referentiestandaarden en -materialen, gebruikte methoden en apparatuur, omgevingsomstandig-

heden, eigenschappen en conditie van het te meten object, en de persoon die de meting uitvoert.

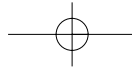
Door voor elke onzekerheidsbron een standaardonzekerheid (deviatie) te bepalen, is het mogelijk de uitgebreide onzekerheid van de kalibratie te berekenen, namelijk door de wortel te nemen van alle kwadratisch opgetelde standaardonzekerheden. Door deze uitgebreide onzekerheid te vermenigvuldigen met een dekkingsfactor 2 wordt de vergrote onzekerheid verkregen. Hierbij speelt de bekende normale verdelingscurve een belangrijke rol, want de vergrote onzekerheid ( $k = 2$ ) komt overeen met een betrouwbaarheidsinterval van 95,4%. Oftewel een onzekerheidsgebied ter grootte van 4x de standaarddeviatie ( $\pm 2s$ ) rondom de gemiddelde waarde van de reeks meetuitkomsten.



Afbeelding 8. Interferometrisch kalibreren van een stappen-eindmaat in de kalibratiedienst van Mitutoyo Nederland.

De zogeheten kalibratiehistorie toont kalibratie-uitkomsten met hun onzekerheidsgebied als functie van de tijd. De grootte  $E_n$ , de verhouding van het verschil tussen twee uitkomsten en een soort kwadratisch gemiddelde spreiding, geeft aan of de onzekerheidsgebieden de twee uitkomsten wederzijds uitsluiten. Als  $E_n > 1$  is er te weinig overlapping van die gebieden en moet er worden getwijfeld aan de stabiliteit van het meetinstrument of de betrouwbaarheid van de twee kalibraties.

Op dezelfde manier kunnen ook in een zogeheten ringvergelijking de verschillende kalibratielaboratoria met elkaar worden vergeleken. Daarbij meten die laboratoria steeds hetzelfde object. Een Youden-plot maakt het mogelijk de meetresultaten van een ringvergelijking verder te analyseren en geeft



inzicht in het aandeel van systematische, respectievelijk toevallige fouten in opvolgende kalibratieresultaten.

D'Hooghe constateert tot slot een verandering in de totstandkoming van normen. Vroeger bepaalden normen de specificatie van meetinstrumenten, vandaag de dag doen de fabrikanten dat zelf. Door hun innovatie en kennis zijn zij beter in staat specificaties vast te stellen en aan te tonen.

### Kwaliteit van software

Richard Koops, wetenschappelijk medewerker van het NMI, zegt dat software voor de analyse van meetgegevens vaak een soort black box is waarvan niet bekend is hoe de data daarin worden gemanipuleerd. Hoe kan worden gewaarborgd dat software daadwerkelijk functioneert zoals wordt verondersteld?

Software is te onderscheiden in gesloten en open soorten. In het eerste geval is de source code onbekend en zijn formats, analysemodel en implementatie ontoegankelijk. In het tweede geval is de source code wel beschikbaar en zijn de genoemde gegevens toegankelijk. Gesloten software vormt dus echt een black box. Die kan worden gevalideerd door van gemakkelijk te analyseren gegevens te controleren of er verschil is tussen het gewenste en berekende meetresultaat. Ook kunnen berekende resultaten van verschillend geïmplementeerde software met elkaar worden vergeleken.

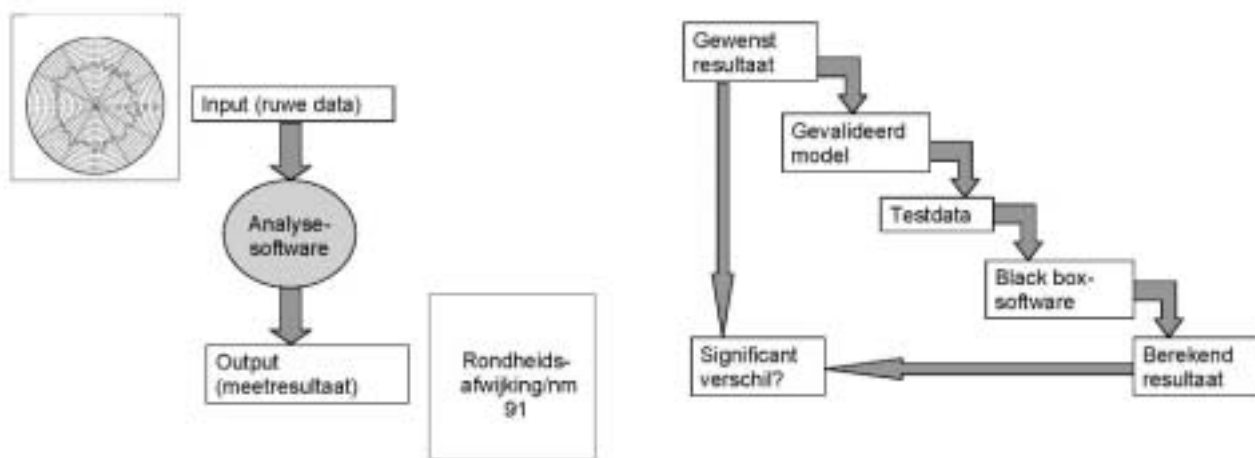
Open software is weliswaar toegankelijker, maar validatie is moeilijk omdat de werking moet worden begrepen. Maar als het algoritme kan worden gevalideerd, is er sprake van een volledige dekking van het meetwaardegebied, terwijl dat bij gesloten software meestal beperkt is. Koops beschrijft aan welke voorwaarden een goed validatierapport dient te voldoen. Zie ook Afbeelding 9.

Tot slot beveelt Koops aan de kwaliteit van software te behouden door te zorgen voor goede back-ups en regelmatige updates. Zo heeft het symposium een zinvolle update gegeven van de geometrische precisiemeettechniek.

#### Informatie

a.drenth@zeiss.nl  
ott@ibspe.com  
h.haitjema@mitutoyo.nl  
f.dhooghe@mitutoyo.nl  
rkoops@nmi.nl

www.nmi.nl  
rbergmans@nmi.nl (voor  
proefmetingen op de Zeiss  
F25 in NMI VSL)



Afbeelding 9. Blokschema's:

a) functionaliteit van analysesoftware (hier getoond met willekeurig voorbeeld van input en output); b) validatie van een 'black box'.

