

# Nauwkeurig, betrouwbaar

**NMi Van Swinden Laboratorium, het nationale standaardeninstituut, ontwikkelt voortdurend nieuwe standaarden, instrumenten en meetmethoden om te voldoen aan de metrologische behoeften van industrie, overheid en maatschappij. Een van de nieuwste faciliteiten op het gebied van dimensionele metrologie is de F25 micro-coördinatenmeetmachine ( $\mu$ -CMM), waarmee producten kunnen worden opgemeten in drie dimensies met onzekerheden van een paar honderd nanometer of minder.**

• **Marijn van Veghel** •

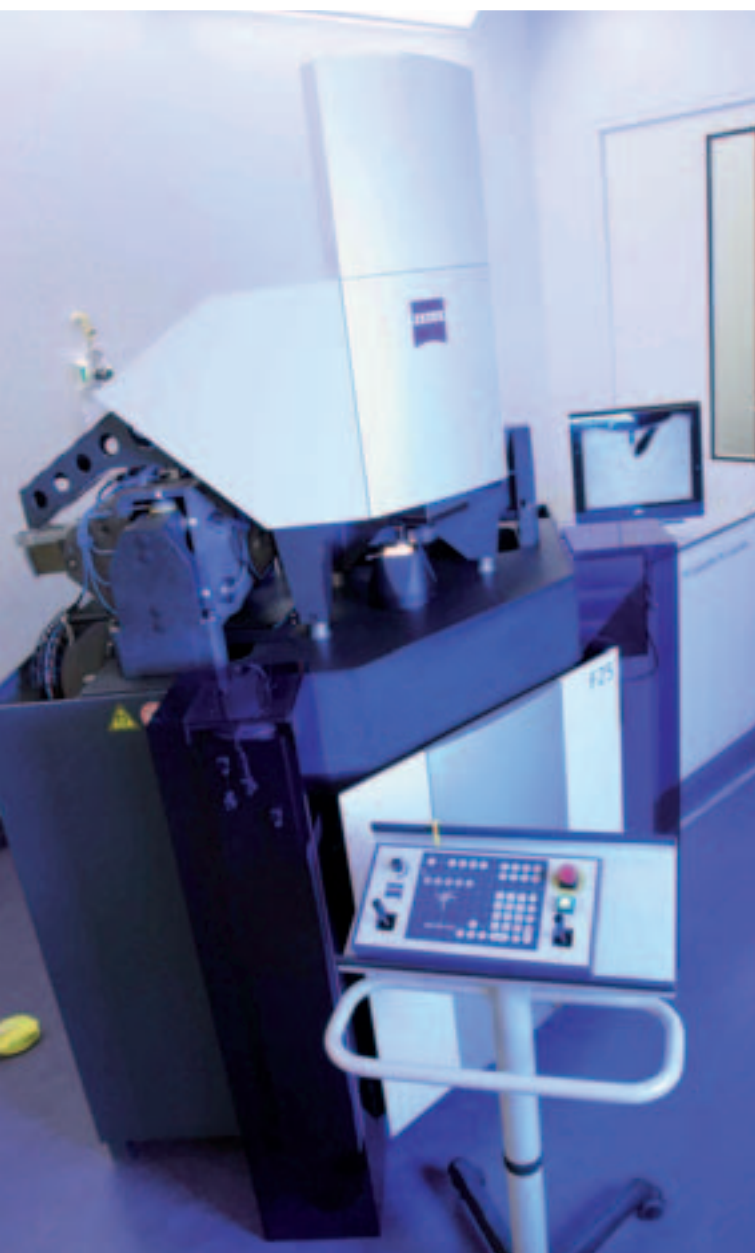
**E**en belangrijke ontwikkeling in de techniek is de steeds verder gaande miniaturisatie. Apparaten zoals mobiele telefoons, harde schijven, maar ook bijvoorbeeld medische devices en printkoppen, worden steeds kleiner en bevatten in dat kleinere volume een toegenomen functionaliteit. Om dit mogelijk te maken worden ook de toleranties op de onderdelen waaruit deze apparaten zijn opgebouwd steeds kleiner. Hetzelfde geldt voor de fabricageapparatuur waarmee de onderdelen vervaardigd worden. Denk aan matrijzen of geleidingen van bewerkingsmachines. Toleranties van minder dan een micrometer zijn geen uitzondering meer. Om te garanderen dat producten aan de tolerantie-eisen voldoen, zijn betrouwbare metingen nodig met een voldoende lage onzekerheid (alle in dit artikel genoemde onzekerheden zijn twee keer de standaardonzekerheid, hetgeen overeenkomt met 95% betrouwbaarheid). Met de F25  $\mu$ -CMM kan NMi Van Swinden Laboratorium (NMi VSL) dergelijke metingen uitvoeren, hetzij van producten zelf, hetzij van standaarden die als referentie kunnen dienen voor metingen bij de fabrikanten van precisiecomponenten.

## Nanometrologie

De F25 is een van de resultaten van het nanometrologieprogramma binnen NMi VSL; zie Figuur 1. Onder nanometrologie wordt dat deel van de geometrische meettechniek verstaan waar metingen worden verricht met onzekerheden van een paar honderd nanometer of minder. Naast de F25 beschikt NMi VSL over andere faciliteiten op dit gebied, zoals een scanning probe microscope, een metrologische Fabry-Perot interferometer en een speciaal aangepaste rondheidsmeter; zie Mikroniek nr. 3 van 2006. Deze faciliteiten zijn gehuisvest in een speciaal daarvoor gebouwd laboratorium. Dit Nanolab beschikt over een zeer stabiel klimaat, met temperatuur van  $(20,0 \pm 0,1)$  °C. De luchtkwaliteit is cleanroom klasse ISO-7 en er zijn maatregelen genomen om vibraties te beperken tot maximaal 70 nm bij 2-30 Hz en 0,001 g bij 30-200 Hz.

Bij alle faciliteiten die worden ontwikkeld binnen NMi VSL staat herleidbaarheid voorop. Met herleidbaarheid wordt bedoeld dat een meetresultaat direct of indirect kan worden teruggevoerd naar de bijbehorende nationale

# herleidbaar en meten met de F25



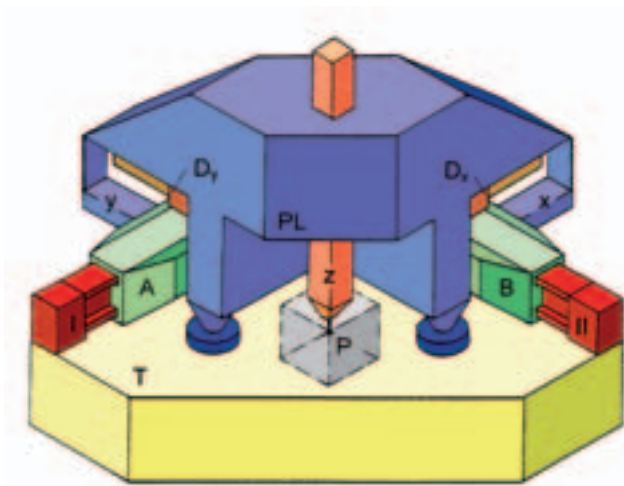
Figuur 1. De F25  $\mu$ -CMM die door NMI VSL in samenwerking met TU Eindhoven en Carl Zeiss is ontwikkeld.

standaard(en). Binnen de nanometrologie gaat het om herleidbaarheid naar de meter. Met andere woorden, een micrometer is echt gelijk aan een miljoenste deel van de meter en een nanometer aan een miljardste deel. Herleidbaarheid biedt het grote voordeel dat meetresultaten objectief worden, zodat metingen verricht door verschillende partijen en/of met verschillende instrumenten met elkaar vergeleken kunnen worden.

## Ontstaan en ontwerp

De F25 is ontstaan uit een samenwerkingsproject van drie partijen: de Technische Universiteit Eindhoven, Carl Zeiss en NMI VSL. Doel van het project was het ontwikkelen van een coördinatenmeetmachine waarmee objecten kunnen worden gemeten met submillimeter-aspecten (posities en diameters van boringen, wanddiktes, enzovoort), en dat met een submicrometer-onzekerheid. In de eerste fase van het project is aan de TU Eindhoven een demonstrator ontwikkeld. Deze is vervolgens door Carl Zeiss doorontwikkeld tot een commercieel product. In beide fasen heeft NMI VSL metrologische kennis ingebracht bij de ontwikkeling. Het eerste productie-exemplaar van de F25 is geïnstalleerd in het Nanolab van NMI VSL. Het kalibratietraject van deze F25 is voltooid, zodat de machine ingezet kan worden voor externe opdrachtgevers.

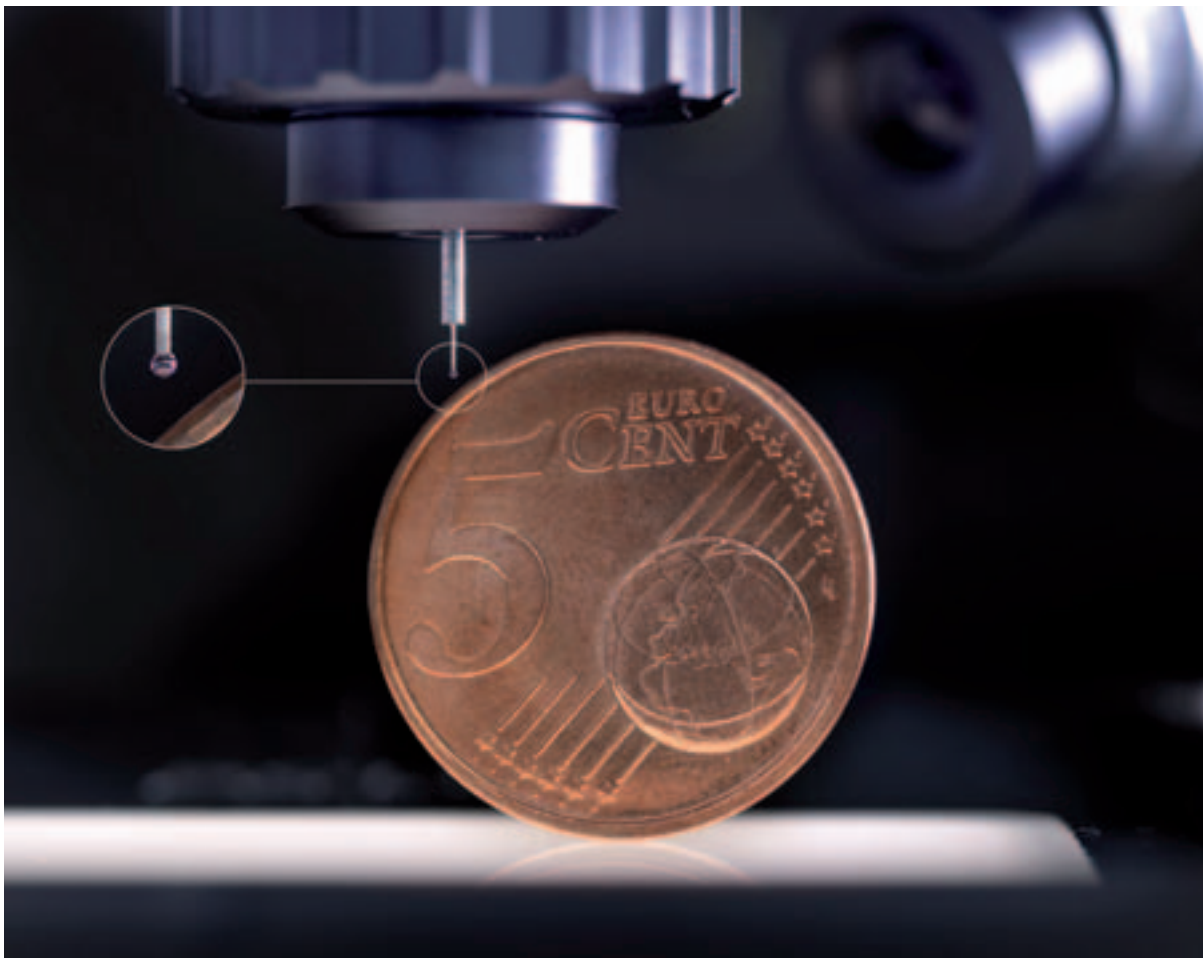
De F25 bestaat uit een aluminium platform, dat beweegt in de x- en y-richting op een granieten tafel met behulp van luchtlagering; zie Figuur 2. In het platform is de pinole opgehangen die zorgt voor de beweging in de z-richting. Het tastsysteem bevindt zich aan het uiteinde van de pinole. De posities van het platform en de pinole worden uitgelezen met behulp van linialen. De leeskoppen voor de x- en y-linialen bevinden zich op twee tussenlichamen, die vrij kunnen bewegen loodrecht op de meetrichting. Door deze constructie worden Abbe-fouten tot nul gereduceerd in het horizontale middenvlak van het meetvolume en daarbuiten sterk verminderd. In totaal heeft de F25 slechts 13 geometrische afwijkingen, tegenover typisch 21 voor een conventionele CMM. Het meetbereik bedraagt  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ .



Het gebruik van aluminium zorgt voor een goede warmtegeleiding, waarmee temperatuurgradiënten binnen de machine worden gereduceerd. Daarnaast is de thermische lus geoptimaliseerd, zodat bij temperatuurveranderingen het werkstuk niet verschuift ten opzichte van het coördinaatensysteem. Desondanks is een goede temperatuurstabiliteit noodzakelijk om vervormingen door gradiënten en tweede-orde-effecten door onzekerheden in de uitzettingscoëfficiënten te minimaliseren.

Figuur 2. Schematische weergave van het mechanische ontwerp van de F25  $\mu$ -CMM.

P: taster; T: granieten tafel; PL: platform; A en B: tussenlichamen; I en II: geleidingen; x en y: liniaalhouders; z: pinole; Dx en Dy: aandrijvingen. (Afbeelding: Marc Vermeulen, TU/e)



Figuur 3. De taster van de F25  $\mu$ -CMM. De diameter van de hier gemonteerde taster bedraagt 300  $\mu$ m.

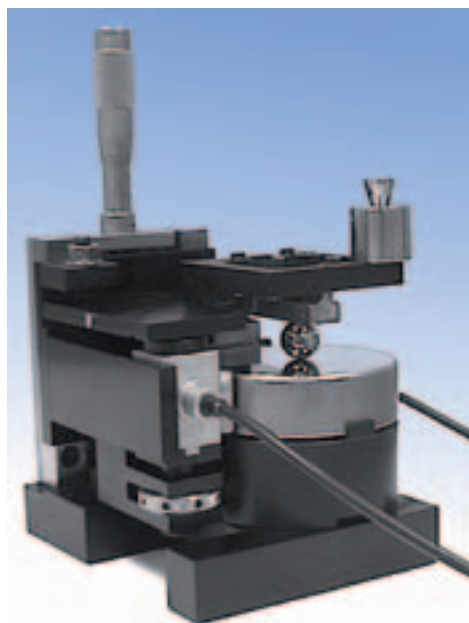
De F25 beschikt over een tactiel en een optisch meetsysteem. Het tactiele meetsysteem meet door middel van het aantasten van het object met een tasterkogel. Deze tasterkogel heeft een diameter van 120 of 300  $\mu\text{m}$ , hetgeen veel kleiner is dan in een gewone CMM; zie Figuur 3. Hierdoor kan de F25 meten in boringen van minder dan een millimeter. De taster is op een silicium membraan gelijkmd. In dit membraan zitten piëzoresistieve elementen die de tasteruittwijking meten. De meetkracht mag gezien de kleine taster-radius niet te hoog zijn, om plastische vervorming van het te meten object te voorkomen, en de elastische vervorming te minimaliseren. Deze bedraagt dan ook slechts 500  $\mu\text{N}$ . Het optische meetsysteem bestaat uit een 2D-visionstelsel met 13 maal vergroting dat langs de z-as is gemonteerd. In de rest van dit artikel richten we ons op tactiele metingen.

### Kalibratie van de F25

Om de herleidbaarheid van de F25 te realiseren moet deze gekalibreerd worden. De totale kalibratie heeft een tweetal aspecten. Allereerst moeten periodiek de geometrische afwijkingen, zoals de rotatieafwijkingen van de geleidingen en de haaksheid, worden gemeten. Deze kalibratie vereist specialistische kennis en apparatuur, zeker gezien de benodigde nauwkeurigheid. NMi VSL beschikt hierover en kan deze kalibratie in eigen beheer uitvoeren. Daarnaast moet elke nieuw gemonteerde taster worden gekalibreerd. De besturingssoftware van de F25 beschikt over speciale functies hiervoor, waarmee dit kalibratieproces semi-automatisch verloopt.

De tasterkalibratie omvat de kalibratie van de tastergevoeligheid en de tasterdiameter. De tastergevoeligheid wordt gekalibreerd door de taster tegen een plat vlak te plaatsen en het platform loodrecht hierop te bewegen. Het taster-sig-naal dat van de piëzo-elementen in de membraan komt kan zo worden gekalibreerd tegen de linialen.

Behalve de gevoeligheid van de taster moet ook de diameter worden bepaald, aangezien deze bij de gemeten verplaatsing van de linialen moet worden opgeteld (voor een binnenmaat) of afgetrokken (voor een buitenmaat). De tasterradius wordt gemeten met behulp van een referentiekogel met een bekende diameter, net als bij een gewone CMM. De nauwkeurigheid waarmee deze referentiekogel zelf is gekalibreerd is natuurlijk extra belangrijk. Om deze reden heeft NMi VSL een speciaal kogelmeetinstrument ontworpen, waarmee de diameter van referentiekogels kan

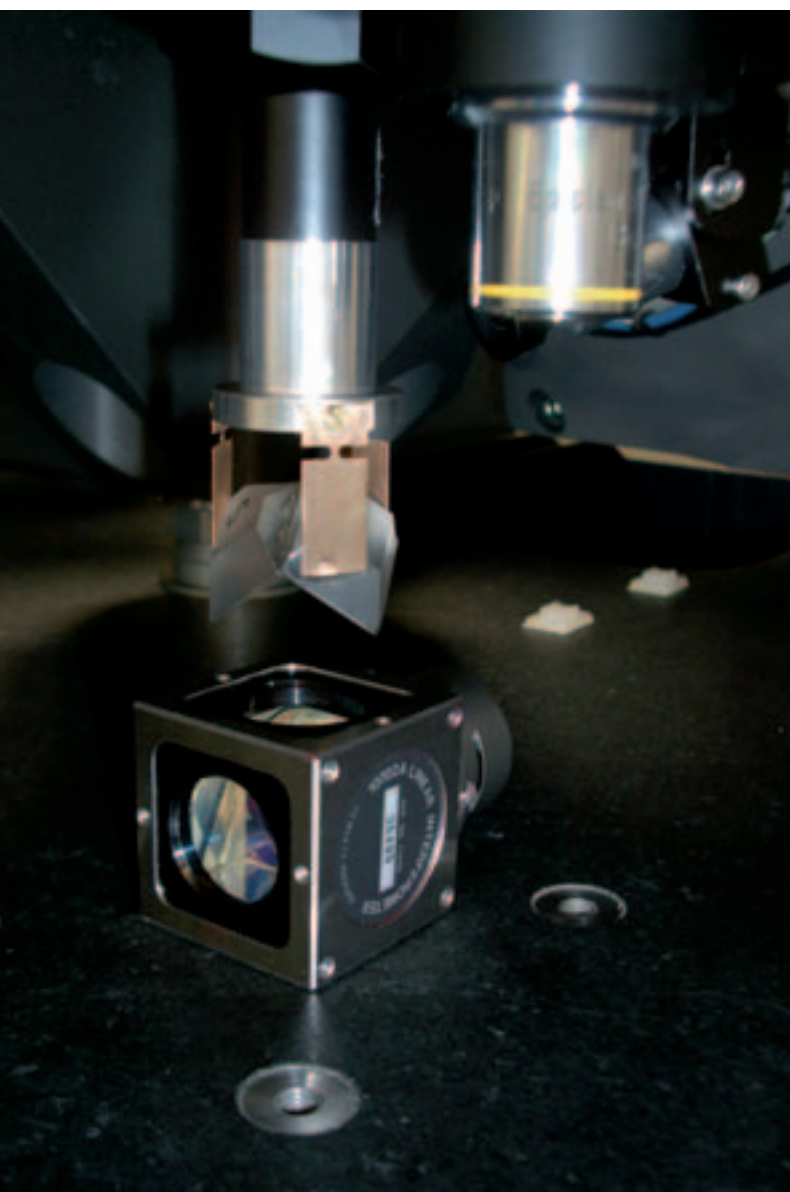


Figuur 4. Het door NMi VSL ontworpen kogelmeetinstrument, waarmee de diameter van referentiekogels met een onzekerheid van 35 nm kan worden gemeten.

worden gemeten met 35 nm onzekerheid; zie Figuur 4. Dit unieke instrument meet de diameter van de kogel interferometrisch door hem in te sluiten tussen twee parallelle eindmaten. De kracht op de kogel wordt gevarieerd, zodat de diameter bij meetkracht nul kan worden bepaald. De rondheid van de referentiekogels kan worden gemeten in NMi VSL's state-of-the-art rondheidsmeter, die een onzekerheid van 5 nm heeft. De geselecteerde referentiekogels voor de F25 hebben een nominale diameter van 8 mm en een onrondheid van minder dan 25 nm. De tasterdiameter kan hiermee worden bepaald met een reproduceerbaarheid van 18 nm.

De geometrische afwijkingen bestaan uit de afwijkingen van de drie assen in termen van lineariteit, hoekafwijking en rechtheid, gecombineerd met de haaksheid van de assen. Lineariteit, hoekafwijking en rechtheid worden gemeten met een laserinterferometer; zie Figuur 5. De laser is rechtstreeks tegen de primaire standaardlaser gekalibreerd, voor een zo direct mogelijke herleidbaarheid. Belangrijk is verder een uiterst nauwkeurige uitlijning met behulp van een positiegevoelige detector, en een zorgvuldige beheersing en registratie van de klimaatcondities. Door het gebruik van speciale software die tegelijkertijd de machine aanstuurt

en de laserinterferometer uitleest, kan een gedetailleerde karakteristiek van de as in kwestie worden vastgelegd. Op basis van de gemeten afwijkingen wordt vervolgens een compensatieveld uitgerekend, waarmee voor de afwijkingen kan worden gecorrigeerd.



Figuur 5. Opstelling voor het meten van de lineariteitsafwijking van de z-as. De speciaal geconstrueerde lichtgewicht retroreflector is op de tasterhouder geschroefd, zodat precies op de positie van de taster wordt gemeten.

De haaksheid van de F25 wordt gekalibreerd met een omslagmethode, gebaseerd op de afstand tussen twee bollen die onder een hoek ten opzichte van de assen zijn geplaatst. De bollen worden gemeten in twee standen die ten opzichte van elkaar 180 graden gedraaid zijn. Uit het verschil tussen de gemeten afstand kan de haaksheidsafwijking worden berekend.

### Onzekerheidsbudget

De resultaten van de kalibratie van de F25 zijn een belangrijke input voor het onzekerheidsbudget. Er zijn drie hoofdbronnen voor de onzekerheid: de geometrische afwijkingen, thermische effecten en tastergerelateerde effecten. De geometrische afwijkingen zijn gemeten met een bepaalde onzekerheid, die natuurlijk doorwerkt in de totale onzekerheid van de machine. Daarnaast laat de besturingssoftware het (nog) niet toe om voor alle afwijkingen te corrigeren; de niet-gecorrigeerde afwijkingen moeten als onzekerheid worden meegenomen. Ook de lange-termijndrift in de afwijkingen moet worden afgeschat en als onzekerheidsbron worden meegenomen. Uit de historie die we tot nu toe hebben vergaard, blijkt dat de stabiliteit van de geometrische afwijkingen van de F25 geen probleem is.

Thermische onzekerheidsbijdragen zijn geminimaliseerd in het ontwerp van de F25 door het gebruik van Zerodur linalen en de gecompenseerde thermische lus. Wat overblijft zijn secundaire effecten ten gevolge van de onzekerheden op de uitzettingscoëfficiënten van de gebruikte materialen en vervormingen als gevolg van een niet-uniforme temperatuurverdeling.

De taster draagt op meerdere manieren bij aan de onzekerheid. Allereerst is er de onzekerheid op de tasterdiameter en de tasteronrondheid. Daarnaast introduceert de interactie tussen de taster en het oppervlak van het te meten object onzekerheden, bijvoorbeeld door elastische vervorming van taster en/of object. Tot slot is er in het onzekerheidsbudget een term opgenomen voor de herhaalbaarheid.

De onzekerheid waarmee een punt kan worden gemeten ten opzichte van een ander punt hangt af van de positie die deze punten innemen in het meetvolume. Voor een typische afstand van 10 mm bedraagt de 3D meetonzekerheid 180 nm.

## Kalibraties met de F25

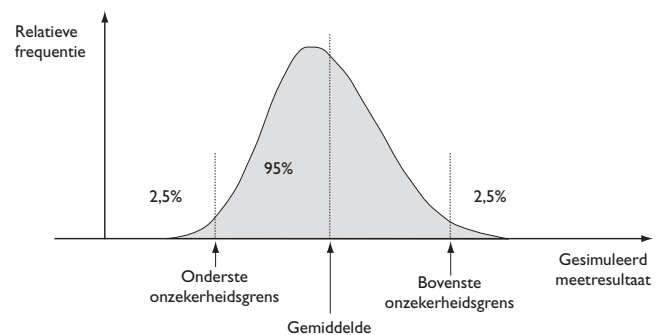
De F25 is uitgerust met het Calypso softwarepakket van Zeiss, waardoor in principe dezelfde meettaken kunnen worden uitgevoerd als met een conventionele CMM, dat wil zeggen: meting van plaats, afmeting en vorm van allerlei geometrische elementen. De verschillen zijn dat er binnenin veel kleinere ruimtes kan worden gemeten door de kleinere taster en dat de onzekerheid op een ander niveau ligt. Daarentegen is het meetvolume beperkter en is er momenteel maar één mogelijke tasterconfiguratie, met een verticale taststift van beperkte lengte.

Een mooi voorbeeld van het soort object dat met de F25 goed kan worden gemeten is de basisplaat van een mechanisch horloge, waarop de draaiende onderdelen bevestigd zijn. Het is natuurlijk belangrijk dat alle onderdelen op de juiste afstand ten opzichte van elkaar geplaatst zijn, hetgeen gecontroleerd kan worden door de posities van de boringen op te meten. Natuurlijk is ook de diameter van de boringen van belang, en of ze mooi recht geboord zijn. Dit alles kan met de F25 gemeten worden. Het is zelfs mogelijk een beeld te krijgen van de rondheid van de boringen of van de regelmaat van de vertanding van de tandwielen zelf.

Om herleidbare kalibraties te kunnen uitvoeren met de F25, moet ook de onzekerheid die hoort bij de meettaak in kwestie worden bepaald. Dit is geen triviale opgave, ook niet als de 3D punt-tot-punt onzekerheid van de F25 als gegeven wordt beschouwd. Daarvoor zijn een aantal oorzaken aan te wijzen. Allereerst wordt een meetresultaat vrijwel altijd bepaald uit meerdere meetpunten, bijvoorbeeld bij het meten van de diameter van een cirkel. De onzekerheden in de individuele punten moeten op de goede manier worden gecombineerd tot een onzekerheid op het eindresultaat. Daarbij moet rekening worden gehouden met de correlaties tussen de punten onderling. Deze correlaties komen voort uit effecten die meerdere punten tegelijk beïnvloeden. Een goed voorbeeld hiervan zijn haaksheidsafwijkingen. Een verdere moeilijkheid is het gebruik van niet-analytische berekeningsstappen in de verwerking van de meetpunten, zoals golfengte-afhankelijke filtering en het fitten van vlakken, cilindervormen, enzovoort.

De oplossing die NMI VSL hiervoor hanteert is het bepalen van de taakspecifieke meetonzekerheid door middel van zogeheten Monte Carlo-berekeningen. Hierbij wordt een softwaremodel gemaakt van de meting en de F25 zelf. De

gemeten punten dienen als input voor dit model, evenals een verzameling modelparameters. Voor elk van deze inputgegevens wordt een onzekerheid en een kansverdeling gespecificeerd. Vervolgens worden door random variatie binnen de gespecificeerde onzekerheid nieuwe waarden gesimuleerd. Voor elke set gesimuleerde meetwaarden en modelparameters wordt het bijbehorende meetresultaat uitgerekend. Dit wordt een paar duizend keer herhaald, waardoor een verdeling van meetresultaten ontstaat. Uit de spreiding van de gesimuleerde meetresultaten kan dan de onzekerheid worden bepaald; zie Figuur 6.



Figuur 6. Taakspecifieke onzekerheidsberekening door middel van Monte Carlo-simulaties. Er wordt een verdeling van meetresultaten berekend door de meetpunten en modelparameters random te variëren binnen hun meetonzekerheid. Hieruit kan het onzekerheidsinterval op het meetresultaat worden bepaald. In dit geval komen de onzekerheidsgrenzen overeen met een betrouwbaarheid van 95%.

## Auteursnoot

Marijn van Veghel is als wetenschappelijk medewerker verbonden aan NMI VSL. Tijdens de Precisiebeurs 2007 verzorgde hij een lezing over het onderwerp van dit artikel. NMI VSL bedankt TU Eindhoven en Carl Zeiss voor de samenwerking.

## Informatie

NMI Van Swinden Laboratorium  
Marijn van Veghel  
Tel. 015 - 269 15 17 / 15 00  
mvveghe@nmi.nl  
www.nmi.nl