

Dimensionele metrologie voor geavanceerde fabricagetechnologieën

Het NMI Van Swinden Laboratorium, het nationale standaarden/metrologie-instituut, beheert en ontwikkelt primaire meetstandaarden op het hoogste niveau, ten behoeve van industrie, overheid en maatschappij. Een van de speerpunten is de nanometrologie.

Onlangs heeft het NMI VSL daarvoor een nanolab geopend.

• *Rob Bergmans, Richard Koops en Paul van Kan* •

De behoefte aan geometrische metingen met nanometernauwkeurigheid komt onder meer voort uit de ontwikkelingen in fabricageapparatuur, waardoor producten steeds verder worden geminiaturiseerd. De eisen aan de nauwkeurigheid van deze apparatuur zijn daarom enorm toegenomen. Tevens worden de toleranties voor de vervaardigde producten steeds strikter. Het einde aan de maakbaarheid en de benodigde nauwkeurigheid is nog niet zicht en de eisen hiervoor zullen de komende tijd verder op scherp worden gezet. Om daaraan te kunnen blijven voldoen, is het noodzakelijk dat machines voor de fabricage van precisieonderdelen en producten worden gekalibreerd zodat kan worden vastgesteld of de afwijkingen binnen de gestelde toleranties blijven. Bij het ontwikkelen van nieuw instrumentarium voor de nanometrologie speelt de precisietechnologie een belangrijke rol. Het NMI VSL werkt daarom samen met onderzoeksinstituten en bedrijven, onder meer binnen het IOP Precisietechnologie.

Kalibratie

Voor de kalibratie op nanometerniveau volstaan de 'klassieke' instrumenten en kalibratiemethoden niet meer. Enerzijds

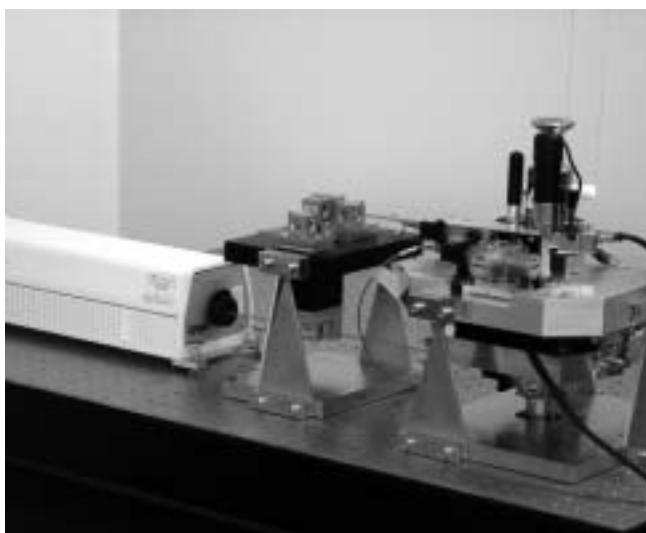
zijn de klassieke instrumenten gebonden aan fysieke beperkingen zoals de resolutie van optische meetsystemen en anderzijds is de fysieke uitvoering van deze instrumenten niet geschikt om meetnauwkeurigheden in het nanometergebied te kunnen leveren. De klassieke kalibratiemethoden die geldig zijn tot in het micrometergebied, zijn in het algemeen niet zonder meer schaalbaar naar het nanometergebied. Zowel op het instrumentele vlak van kalibratieapparatuur als op het gebied van kalibratiemethoden moeten nieuwe ontwikkelingen worden gerealiseerd om nanometernauwkeurigheid te kunnen waarborgen en de kwaliteit van productiemachines te optimaliseren. In de recent betrokken nieuwe huisvesting van het NMI VSL is voor de nanometrologie een speciaal lab gerealiseerd, met eisen voor stof (klasse 10.000-1000), temperatuur (20 ± 0.1 °C) en trillingen (1-10 Hz; ampl. < 50 nm). Hieronder volgt een presentatie van de eerste faciliteiten die nu operationeel zijn in het nanolab.

Metrologische Scanning Probe Microscope

Voor het opmeten van het oppervlakteprofiel van werkstukken in drie dimensies (3D) met meetnauwkeurigheden van

enkele nanometers kan een scanning probe microscope (SPM) worden gebruikt. Dit instrument tast een werkstuk af met een probe die zelf afmetingen heeft van slechts enkele micrometers. Deze taster wordt in een rasterpatroon aangestuurd waarbij de positie ten opzichte van het werkstuk wordt vastgelegd. Uit de meetdata kan hierna het oppervlakprofiel van het werkstuk worden gereconstrueerd en worden gebruikt om relevante parameters zoals vorm of ruwheid te bepalen. Welbeschouwd is de SPM het enige instrument waarmee meetnauwkeurigheden van enkele nanometers in 3D kunnen worden gerealiseerd. Een randvoorwaarde is wel dat het meetgebied veelal is beperkt tot circa 0,1 mm in het laterale meetvlak en 0,01 mm loodrecht daarop.

Scanning probe microscopie bestaat al velen jaren en is oorspronkelijk vooral toegepast in de wetenschappelijke wereld. De techniek vindt tegenwoordig echter meer en meer toepassing bij kwaliteitscontrole van producten. Het is een van de weinige instrumenten waarmee zelfs atomaire resolutie realiseerbaar is, maar de nauwkeurigheid is vaak van een heel andere orde. Afwijkingen van meer dan 20% zijn mogelijk bij commerciële SPM's. Om deze reden heeft het NMI VSL de afgelopen jaren gewerkt aan de realisatie van een zogeheten metrologische SPM, met als doel een meetnauwkeurigheid van enkele nanometers. Daartoe is het instrument vanaf de ontwerpfase zoveel mogelijk geoptimaliseerd voor wat betreft constructie, thermisch gedrag en toe te passen meetprincipes. Figuur 1 toont de SPM-opstelling.



Figuur 1. Metrologische SPM, met links de laser voor het meetsysteem, rechts de SPM en daartussen de bundelpaden aangegeven. De laserbundel wordt door middel van een stelsel optiek verdeeld in drie bundels, voor de drie meetassen (X, Y en Z).

Het systeem bestaat uit een commercieel verkrijgbare SPM-taster en een precisiemechanisme voor verplaatsing van het werkstuk in 3D. In plaats van een scanning probe zoals bij een conventionele SPM is hier dus sprake van een scanning sample systeem omdat dit een hogere meetnauwkeurigheid toelaat vanwege het Abbe-principe. De positie van de SPM-taster ten opzichte van het werkstuk wordt in dit systeem gemeten met behulp van drie laserinterferometers, voor elke bewegingsas één. Door het gebruik van laserinterferometers is de herleidbaarheid van dit kalibratie-instrument zo direct mogelijk, waardoor de meetonzekerheid wordt geminimaliseerd.

Het thermisch centrum in de constructie valt samen met de positie van de SPM-probe en is dus in eerste orde ongevoelig voor temperatuurafwijkingen. Om hun storende invloed verder te minimaliseren, is het zogeheten metrologieframe geheel uit invar gemaakt. Tenslotte zijn de detectoren voor de laserinterferometers niet in de directe omgeving van het instrument aangebracht, maar wordt het (optische) interferometersignaal via glasvezels naar de detectie-elektronica geleid.

Op nanometerniveau hebben trillingen een grote invloed op de metingen. Vandaar dat de metrologische SPM een eigen fundering heeft, geïsoleerd ten opzichte van de rest van het gebouw. Deze constructie bestaat uit een granieten sokkel van 80 x 80 x 80 cm³ die rust op een zeer groot betonblok dat op drie heipalen staat.

Een van de toepassingen voor dit instrument zal vooral liggen op het gebied van de kalibratie van standaarden, zoals staphoogte, periodiciteit en lijnbreedte. Met deze standaarden kunnen andere SPM's en elektronenmicroscopen worden gekalibreerd.

Metten van kleine producten

In de precisietechnologie worden vaak 3D-Coördinaten-MeetMachines (CMM's) gebruikt om de driedimensionale vorm van een product te bepalen. Een CMM bestaat uit een aantal precisiegeleidingen waarmee een nauwkeurig tastsysteem naar elk willekeurig punt op een object gebracht kan worden. Bij een meting worden voor elk meetpunt de linialen van de meetmachine uitgelezen, waarna de coördinaten van het meetpunt worden berekend. Door het object op vele punten aan te tasten, kunnen de ruimtelijke kenmerken van het object worden verkregen, zoals een diameter, een vlak of een lijn. Het meetvolume van een conventionele CMM is typisch 1 m³ en de nauwkeurigheid is op zijn best enkele mm's. Producten worden echter kleiner en de toleranties strikter, waardoor voor onder meer micromechanische onderdelen en microsysteemtechnologieproducten de behoefte is ontstaan aan een betere nauwkeurigheid voor 3D-meten.

Om nauwkeurig 3D-metingen aan micromechanische delen te kunnen realiseren, dient aan enkele voorwaarden te worden voldaan:

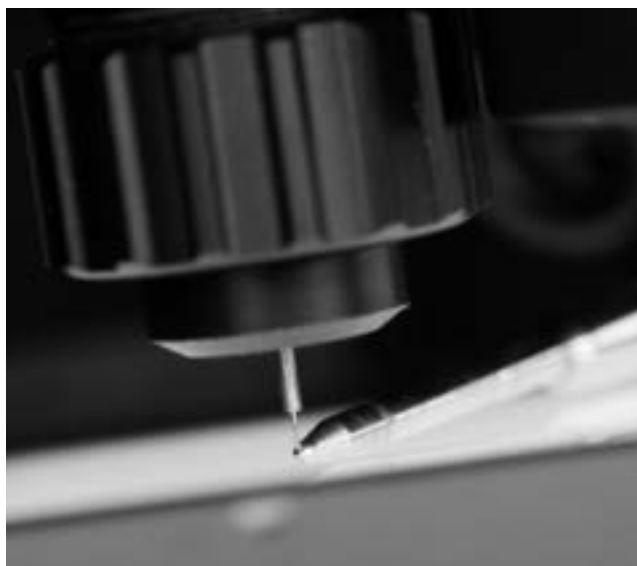
- een CMM met een hoge basisnauwkeurigheid door een vernieuwend ontwerp;
- een kleine en zeer nauwkeurige taster;
- goede omgevingscondities;
- slimme meetstrategie, onder meer voldoende meetpunten, c.q. scannend meten;
- software die complexe vormen en kenmerken kan meten.

De door het NMI VSL, de Technische Universiteit Eindhoven en Zeiss ontwikkelde microCMM F25 voldoet hieraan; zie Figuur 2. Deze heeft een volledig nieuw ontwerp met een zeer hoge basisnauwkeurigheid. Zo meet de machine vrijwel volledig in Abbe, wordt gebruikt gemaakt van hoognauwkeurige zerodur linialen met een resolutie van 7,8 nm en heeft hij een hoge stijfheid. In plaats van de circa 30 geometrische afwijkingen van een conventionele meetmachine heeft de microCMM er nog maar 13. Door het nauwkeurig kalibreren en vervolgens corrigeren van deze afwijkingen en het plaatsen van de microCMM in een omgeving met een temperatuurstabiliteit van $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ wordt een nauwkeurigheid van $< 100\text{ nm}$ in het bereik van $100 \times 100 \times 100\text{ mm}^3$ nagestreefd.



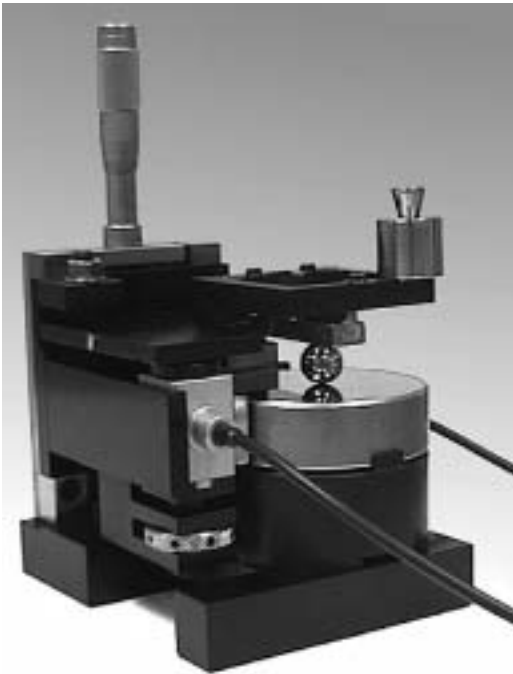
Figuur 2. De F25 microCMM in het nieuwe nanolab.

Voor het meten aan kleine structuren zijn ook kleine tastsystemen nodig. Als tastsysteem wordt een silicium membraan-chip gebruikt met daarin piëzoresistieve elementen. Op deze chip is een taststift gemonteerd met daaraan een kogel met een diameter van 0,1-0,3 mm; zie Figuur 3. Omdat het aantastoppervlak veel kleiner is dan bij conventionele CMM's, zou de contactdruk toenemen bij een vergelijkbare aantastkracht. Dit is niet gewenst vanwege plastische vervorming van het te meten object. Vandaar dat de aantastkracht zeer klein dient te zijn. Bij de toegepaste taster bedraagt deze slechts $500\text{ }\mu\text{N}$.



Figuur 3. Taster van de F25 microCMM.

Uiteraard dient ook deze taster gekalibreerd te worden, onder meer door de diameter van de tasterkogel te bepalen. Men meet namelijk de maat inclusief de diameter van de tasterkogel, zodat hiervoor gecorrigeerd dient te worden. Dit gebeurt op dezelfde manier als voor een conventionele CMM, namelijk met een ijk kogel. Deze ijk kogel dient echter veel nauwkeuriger gekalibreerd te worden dan bij een conventionele CMM. Hiervoor heeft het NMI VSL een nieuwe kalibratieopstelling ontwikkeld, waarin de diameter van de kogel met een nauwkeurigheid van 35 nm kan worden vastgesteld; zie Figuur 4. Het meetprincipe berust op interferometrie. Hierbij wordt de afstand gemeten tussen twee parallelle vlakken, te weten de ronde schijf onderin Figuur 4 en de eindmaat bovenop de kogel. Door een meting met en zonder kogel wordt de diameter van de kogel berekend. Hierbij worden met gewichtjes diverse krachten aangebracht, zodat uiteindelijk de diameter bij meetkracht nul herleid kan worden.

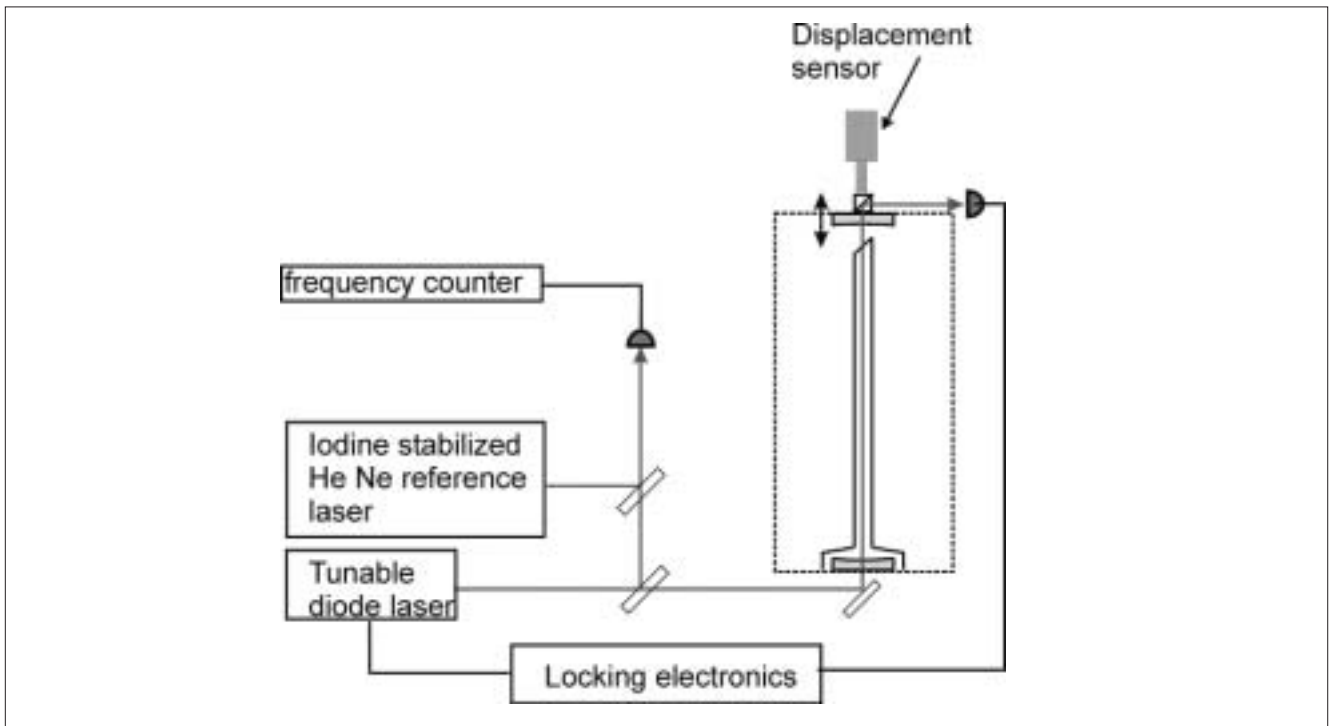


Figuur 4. Opstelling voor het meten van de diameter van kleine ijkkogels.

Kalibratie van nanosensoren en nanopositioners

Positiesensoren (capacitief, inductief) zijn op dit ogenblik al zo gevoelig, dat ze verplaatsingen van een fractie van een nanometer kunnen detecteren. Bij snel variërende, sinusvormige bewegingen met kleine amplitude of bij verplaatsing in kleine, discrete stappen, leveren deze sensoren inderdaad de beloofde prestatie. Als de verplaatsing een groot deel van het meetbereik van de sensor beslaat, is de meetonzekerheid vaak veel groter, omdat de lineariteit van de sensor begrensd is. Op een tijdschaal van enkele minuten is vaak al drift merkbaar, niet alleen in de verplaatsing of dimensies van het te meten object, maar ook in de sensoren, wat tot uiting komt wanneer meerdere sensoren dezelfde verplaatsing meten. De meetsignalen van de sensoren verliezen dan hun correlatie en de meetonzekerheid kan oplopen tot 100 nm in enkele uren.

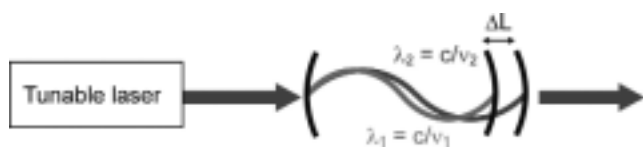
De oorzaak van de toename in de meetonzekerheid in niet-ideale situaties is vaak te vinden in de elektronica die de sensoren uitleest. Anderzijds is de montage van een sensor sterk van invloed op het resultaat. Er is een flink aantal initiatieven genomen om dit soort onzekerheidsbronnen te begrijpen en te minimaliseren. Bij dergelijk onderzoek speelt het NMI



Figuur 5. Schematische weergave van de kalibratieopstelling voor nanosensoren.

VSL een rol in het uitvoeren van herleidbare metingen. Hierbij wordt uitgegaan van de primaire lengtestandaard. Dit is in de praktijk een jodium-gestabiliseerde He-Ne laser. Voor het meten aan nanosensoren is een platform geconstrueerd, dat zo goed mogelijk stil staat; zie Figuur 5. Hierop wordt de sensor gemonteerd. Het centrale deel van het platform is beweegbaar (in verticale richting). Met dit deel beweegt ook de uitreespiegel van een optische Fabry-Perot (FP) resonator die onder het platform hangt. De overige componenten van de resonator (een glazen buis en een inkoppelspiegel) zitten vast aan het stationaire deel van het platform. Door de FP-resonator schijnt de bundel van een externe laser die afstembaar is rond de frequentie van de He-Ne laser. Het frequentieverschil tussen het licht van de standaardlaser en dat van de afstembare laser wordt continu gemeten.

De FP-resonator is te beschouwen als een kopie van de resonator van de standaardlaser die er naast staat. Bij het begin van het experiment wordt het centrale deel van het platform zover opgetild dat de lengte van de FP-resonator gelijk is aan de lengte van de resonator in de standaardlaser. Het frequentieverschil is dan nul. Elke verplaatsing van het centrale deel van het platform resulteert nu in een verandering van de resonantiefrequentie van de FP-resonator; zie Figuur 6. De afstembare laser kan deze frequentieverandering volgen en het frequentieverschil met de standaardlaser neemt toe of af. De gevoeligheid ligt bij de huidige opstelling rond de 3 MHz per nm verplaatsing. De te kalibreren sensor detecteert de verplaatsing van het platform. Vergelijking van de aanwijzing van de sensor met de werkelijke (herleidbare) verplaatsing laat vervolgens direct het kalibratieresultaat zien.



Figuur 6. Relatie tussen frequentie, golflengte en verplaatsing.

In de opstelling van het NMI VSL is het bereik niet beperkt door de 'free spectral range' van de FP-resonator of de bandbreedte van de detector die de verschilfrequentie meet. De afstembare laser kan de frequentie sprongsgewijs op een aangrenzende 'mode' van de FP-resonator instellen en zo het frequentieverschil binnen een bandbreedte van enkele GHz houden, terwijl het platform zich over een afstand van tien-

tallen micrometers herleidbaar kan verplaatsen. Op deze manier kunnen kalibraties worden uitgevoerd over het volledige meetbereik van de meeste sensoren.

Nieuwe ontwikkelingen

Voor de nabije toekomst richt het NMI VSL zich op het verder ontwikkelen van het instrumentarium. Voorbeelden hiervan zijn het IOP-project Nanomefos (TNO Industrie en Techniek, TU/e, NMI VSL) en technologieontwikkeling voor een nanoCMM (TU/e, IBS Precision Engineering, NMI VSL). Hiernaast zal veel aandacht worden besteed aan het ontwikkelen van kalibratiemethoden met dit nieuwe instrumentarium. Door de nanometerschaal waarop de metingen zich afspelen, is met name een goed begrip van de fysische interactie tussen het oppervlak en de taster onontbeerlijk om de vereiste nauwkeurigheden te halen.

Auteursnoot

Rob Bergmans, Richard Koops en Paul van Kan zijn verbonden aan het NMI Van Swinden Laboratorium in Delft.

Informatie

NMI Van Swinden Laboratorium
 Rob Bergmans
 Tel. 015 - 269 16 41 / 15 00
 rbergmans@nmi.nl
 www.nmi.nl