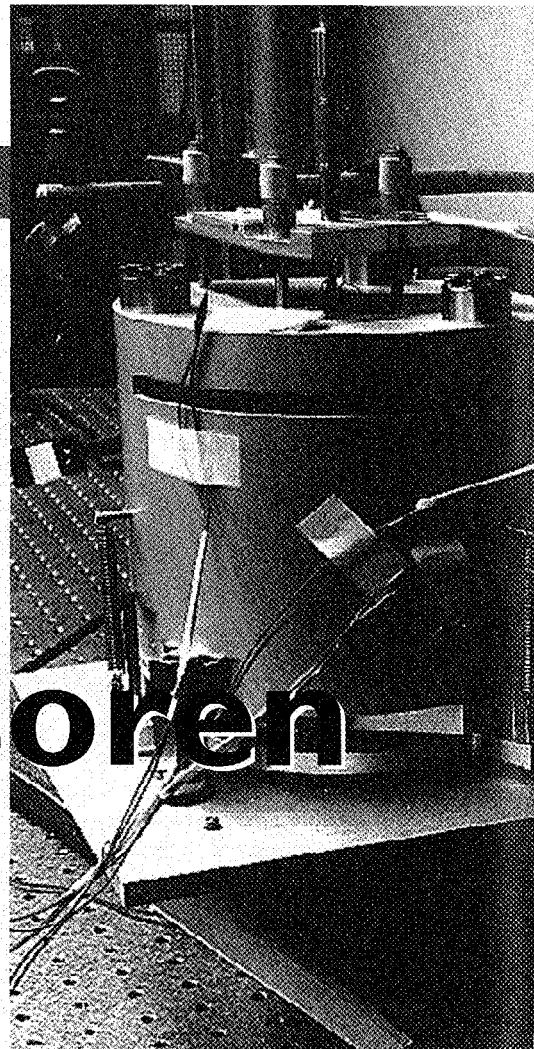


*over lage meetonzekerheid
en hoge nauwkeurigheid*

Kalibratie van nanosensoren



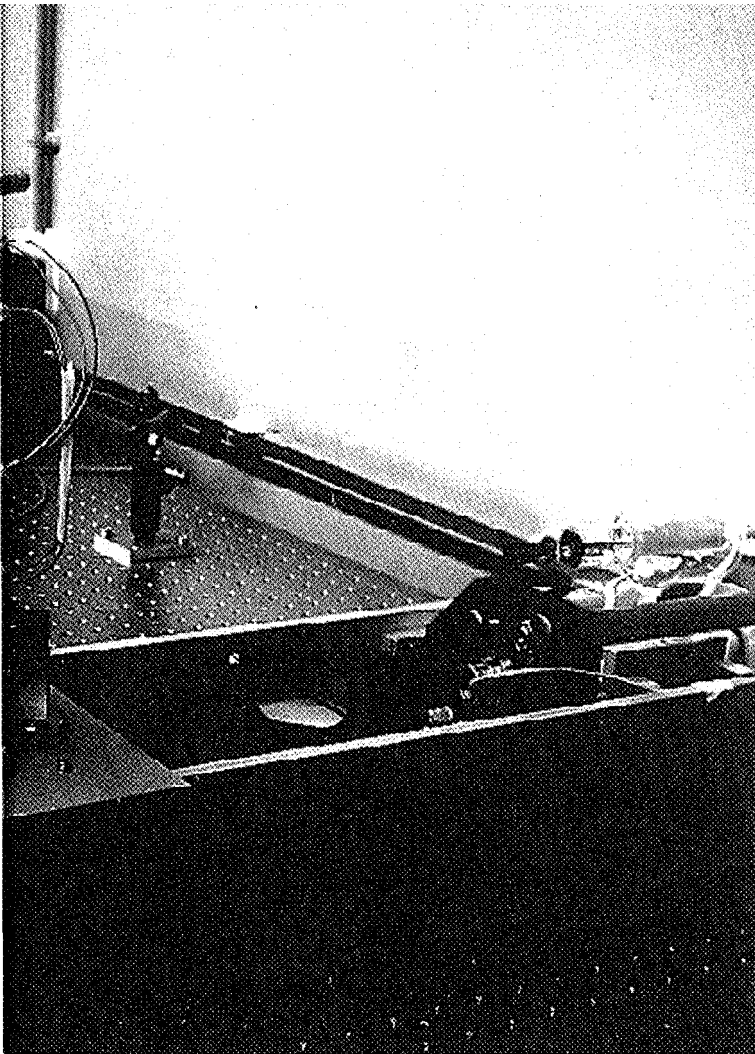
Nanosensoren zijn een categorie sensoren die recent is ontstaan. Deze sensoren worden gekenmerkt door (sub)-nanometerresolutie en een range van tenminste enkele micrometers. De bekendste voorbeelden zijn capacitieve en inductieve sensoren, maar ook laserinterferometers en Atomic Force Microscopen (AFM's) behoren tot deze categorie. De nauwkeurigheid van deze nanosensoren is echter niet vanzelfsprekend van hetzelfde niveau als de resolutie. Effecten zoals gevoeligheidsfouten, niet-lineariteiten en hysteresis kunnen afwijkingen van de aanwijzing veroorzaken van vele nanometers. Om dit soort afwijkingen vast te stellen, waar dan vervolgens voor kan worden gecorrigeerd, is een zeer nauwkeurige meetopstelling ontwikkeld.

De steeds hogere kwaliteitseisen in de productie en het onderzoek vragen om steeds lagere meetonzekerheden. Een lage meetonzekerheid resulteert in een hoge nauwkeurigheid. Om in deze behoefte te blijven voorzien, heeft het NMI Van Swinden Laboratorium (het Nederlandse Nationale Standaardenlaboratorium) enkele jaren geleden een zogeheten nanometermetrologie missieproject gestart. Het doel van dit project is de ontwikkeling van een aantal kalibratiefaciliteiten met nauwkeurigheden in het nanometergebied. Om dit te realiseren is een samenwerkingsverband aangegaan met de Sectie Precision Engineering van de Technische Universiteit Eindhoven. Een van de kalibratiefaciliteiten die is gerealiseerd, dient voor de kalibratie van nanosensoren met een bereik tot maximaal 300 nm met een nauwkeurigheid van ongeveer 1 nm.

Om een nanosensor te kalibreren dient er, net zoals bij elk meetinstrument, gezorgd te worden voor herleidbaarheid. Dat wil zeggen dat de kalibratie moet zijn terug te voeren naar de internationale definitie van de meter. Er dient dus een koppeling te worden gerealiseerd tussen de nanosensors en de Meter. De praktische uitvoering van de Meter heeft sinds 1983 de vorm van een jodium gestabiliseerde HeNe-laser. De golflengte van deze laser is gekoppeld aan de hyperfijnstructuur van het $^{127}\text{I}_2$ -molecuul. De nauwkeurigheid van golflengte van deze Jodium-gestabiliseerde laser is momenteel $5 \cdot 10^{-11}$.

De kalibratie-opstelling

De gekozen oplossing voor de koppeling tussen de Meter en de nanosensor is weergegeven in figuur 1.



De basis is een Fabry-Perot interferometer, die bestaat uit twee evenwijdige spiegels op een afstand L van elkaar. Wanneer licht van een volg-laser in de Fabry-Perot interferometer wordt gescheten, vindt een resonantie plaats als de golflengte precies een geheel aantal malen in de afstand L tussen de spiegels past. Met behulp van een regelcircuit wordt de golflengte van de volg-laser aangepast, zodat er altijd resonantie optreedt in de Fabry-Perot interferometer. Indien nu een spiegel van de Fabry-Perot interferometer wordt bewogen, volgt de golflengte van de laser deze beweging. De golflengte is via de lichtsnelheid, c , gekoppeld aan de frequentie. Een verandering van de golflengte van de volg-laser betekent dus automatisch een verandering van de frequentie van de volg-laser. De verplaatsing, dL , van de spiegel heeft hierdoor de volgende relatie met de frequentieverandering, df van de laser:

$$L = n\lambda = \frac{nc}{f} \Rightarrow -dL = -\frac{nc}{f^2} df = -\frac{L}{f} df$$

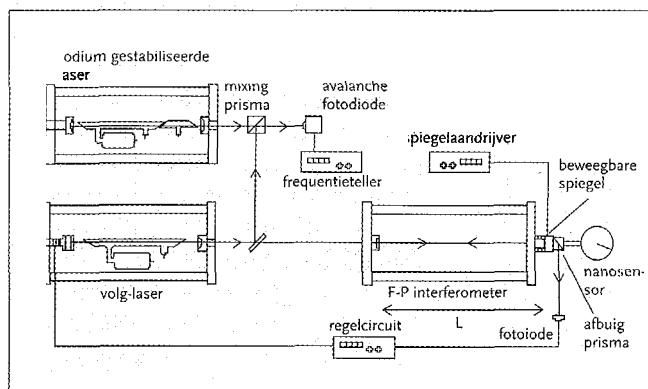
De frequentie – en dus ook de frequentieverandering – van de volg-laser kan zeer nauwkeurig worden bepaald. Het rechtstreeks koppelen van de verplaatsing aan de frequentie heeft het verdere voordeel dat er geen *fringe fraction* bepaling nodig is, zoals bij vele andere interferometers. Hierdoor is er dus ook geen sprake van daarbij optredende interpolatiefouten.

De meting van de frequentie van de volg-laser gebeurt door deze te vergelijken met de frequentie van een Jodium gestabiliseerde HeNe laser (de Meter), zie figuur 1. Omdat ook de resonatorlengte L , zeer nauwkeurig is vastgesteld volgt dus uit de meting van df meteen dL . De Fabry-Perot interferometer zorgt dus voor een directe real-time koppeling tussen de nanosensor en de Meter. Om deze reden is de opstelling dan ook 'Metrologische Fabry-Perot interferometer' gedoopt. Uiteraard dient de kalibratieopstelling, om de vereiste 1 nm nauwkeurigheid te realiseren, thermomechanisch zeer stabiel te zijn en een minimale invloed van trillingen te ondervinden. Bij het ontwerp van de 'Metrologische Fabry-Perot' is hieraan door Dr. ir. S. Wetzels, die de opstelling tijdens zijn promotieonderzoek heeft ontwikkeld, dan ook zeer veel aandacht besteed.

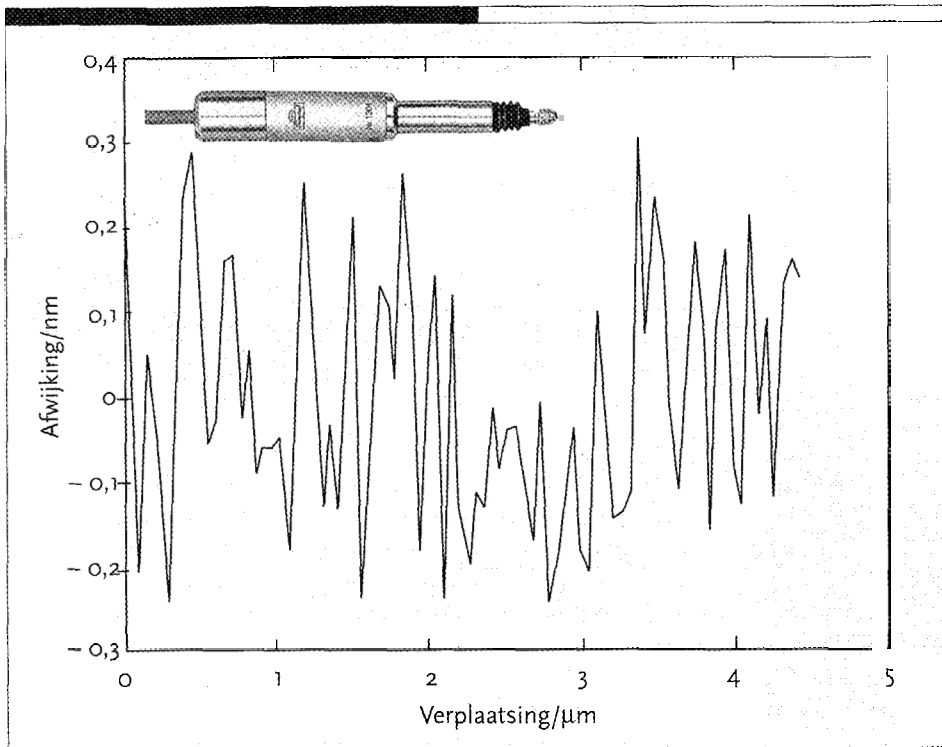
Om een kalibratie uit te voeren wordt de sensor op de beweegbare spiegel van de Fabry-Perot interferometer geplaatst, zie figuur 1. De sensor zal dus de opgelegde verplaatsing, dL , van de spiegel volgen. Door de aanwijzing van de sensor te vergelijken met de werkelijke verplaatsing, dL van de spiegel worden de kalibratiegegevens verkregen. Om de onzekerheid, ofwel nauwkeurigheid van de kalibratieopstelling, vast te stellen is het nodig om een zogenaamd onzekerheidsbudget op te stellen conform de *ISO-Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Kort gezegd komt dit neer op het inventariseren van alle bronnen die bijdragen tot de onzekerheid om daar vervolgens een waarde aan toe kennen. In dit geval zijn de bronnen onder andere: de variatie van de brekingindex van lucht, de thermische uitzetting van de constructie, vervorming door thermische gradiënten, de tilt van de beweegbare spiegel, uitlijnnauwkeurigheid, de nauwkeurigheid van de resonatorlengte. Dit is niet eenvoudig, het allerbelangrijkste daarbij is dat geen bronnen over het hoofd mogen worden gezien. Indien het sommetje gemaakt wordt leidt dit tot een totale onzekerheid van 1,3 nm.

De inductieve sensor

Het eerste voorbeeld van de kalibratie van een nanosensor is de kalibratie van een Mahr Millitron Nr. 1301 inductieve sensor. De output van de sensor is in dit geval een analogo signaal met een



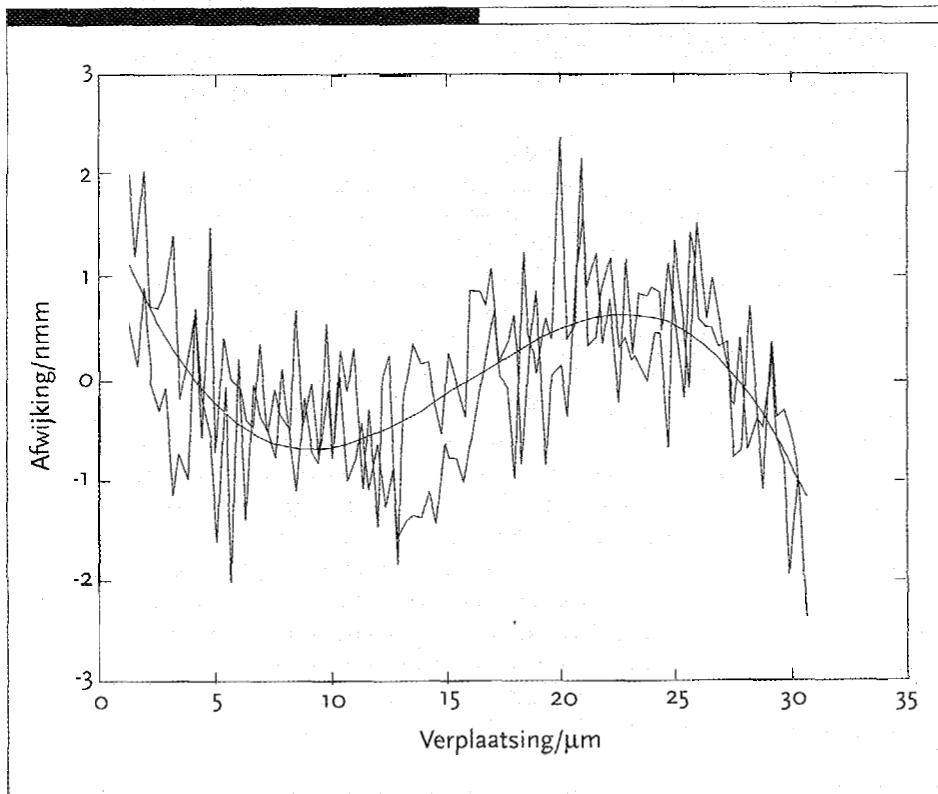
FIGUUR 1: schematische weergave van de kalibratieopstelling voor nanosensoren.



FIGUUR 2: residu na een kalibratie in één bewegingsrichting van de inductieve sensor na een eerste orde fit

uitgangsspanning van 0-3V. Allereerst is een driftmeting uitgevoerd om de stabiliteit van de gehele opstelling, inclusief de sensor vast te stellen. Na ongeveer een

uur wordt een stabiliteit bereikt van ongeveer 1 nm/hr. Als eerste is de sensor gekalibreerd over 4,5 (m, in één bewegingsrichting. De totale meettijd bedraagt onge-



FIGUUR 3: residu na een kalibratie van de inductieve sensor na een eerste orde fit over 30 (m heen en terug.

veer 20 minuten. De gevoeligheidsfactor van de sensor is vastgesteld middels een eerste orde (lineaire) fit door de kalibratie-data en bedraagt 0,96 mV/nm. Dit is 4,4% minder dan de nominale waarde. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door een afwijking van de versterkingselektronica. In figuur 2 staat de afwijking van de kalibratiegegevens, het residu, nadat de eerste orde fit ervan is afgetrokken. Hierdoor worden de afwijkingen ten opzichte van de gemiddelde gemeten gevoeligheidsfactor zichtbaar.

De afwijkingen bevinden zich binnen een bandbreedte van 0,5 nm. De systematische effecten van deze sensor zijn over dit meetbereik dus maximaal een 0,5 nm.

Figuur 3 geeft het residu bij een kalibratie over 30 (m, heen en terug. Het ruisniveau van deze kalibratie is hoger omdat de meetbereik-instelling van de sensor een factor 10 groter is. In figuur 3 is echter duidelijk te zien dat de sensor niet meer lineair is over dit bereik. Het residu kan worden gefit met een sinus met een amplitude van ongeveer 1 nm. Verder is te zien dat hysteresis nagenoeg niet aanwezig is. De inductieve sensor wordt door de fabrikant gespecificeerd als een submicron-sensor. Indien deze echter wordt gekalibreerd en de correcte gevoeligheidsfactor wordt gebruikt, kunnen er nauwkeurigheden van enkele nanometers mee worden gehaald.

De capacitieve sensor

Als tweede voorbeeld hebben we een capacitieve sensor van Lion Precision type PX 405 HC gekalibreerd. Ook hier is eerst weer de totale drift van de meetopstelling vastgesteld. De drift bedroeg in dit geval ongeveer 3 nm/hr. Dit is meer dan in het vorige voorbeeld en wordt vermoedelijk veroorzaakt door de drift van de sensorelektronica. De capacitieve sensor geeft rechtstreeks een waarde in nanometers, met een resolutie van 0,25 nm in zijn gevoeligste stand. Vandaar dat de aanwijzing van de sensor in nanometers is vergeleken met de werkelijke verplaatsing van de spiegel. Hieruit bleek een gevoeligheidsafwijking van -1%, te zien in

figuur 4. Deze afwijking kan niet worden verklaard door uitlijnfouten tijdens de kalibratie, omdat dan een positieve afwijking zou moeten worden gevonden.

Vervolgens is gecorrigeerd voor deze gevoeligheidsafwijking, door weer een eerste orde fit van de kalibratiegegevens af te trekken. In figuur 5 is de niet-lineariteit van de sensor over een bereik van 10 μm duidelijk te zien. De maximale afwijking van de lineariteit is ongeveer 25 nm. Dit is overigens minder dan de specificatie van de fabrikant. Vervolgens is de capacitieve sensor over een groter meetbereik van 200 μm gekalibreerd. De gevoeligheidsafwijking bleek nu $-0,33\%$ te zijn en de maximale afwijking van de lineariteit 100 nm. Wederom is dit minder dan de specificatie van de fabrikant. Verder is te zien uit figuur 5 dat ook de capacitieve sensor nauwelijks hysteresis vertoont.

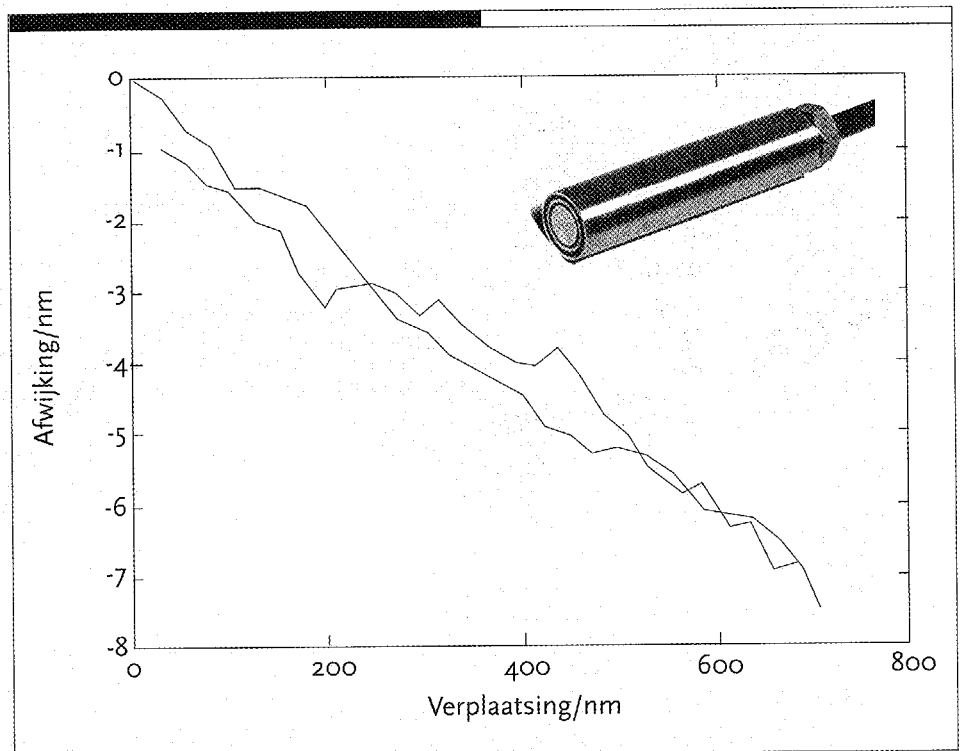
De capacitieve sensor heeft subnanometer-resolutie, maar geen nanometer-nauwkeurigheid als alleen maar voor de gevoeligheidsfactor wordt gecorrigeerd. Om een echte nanosensor te zijn, dient er ook gecorrigeerd te worden voor de niet-lineariteit van de sensor.

Besluit

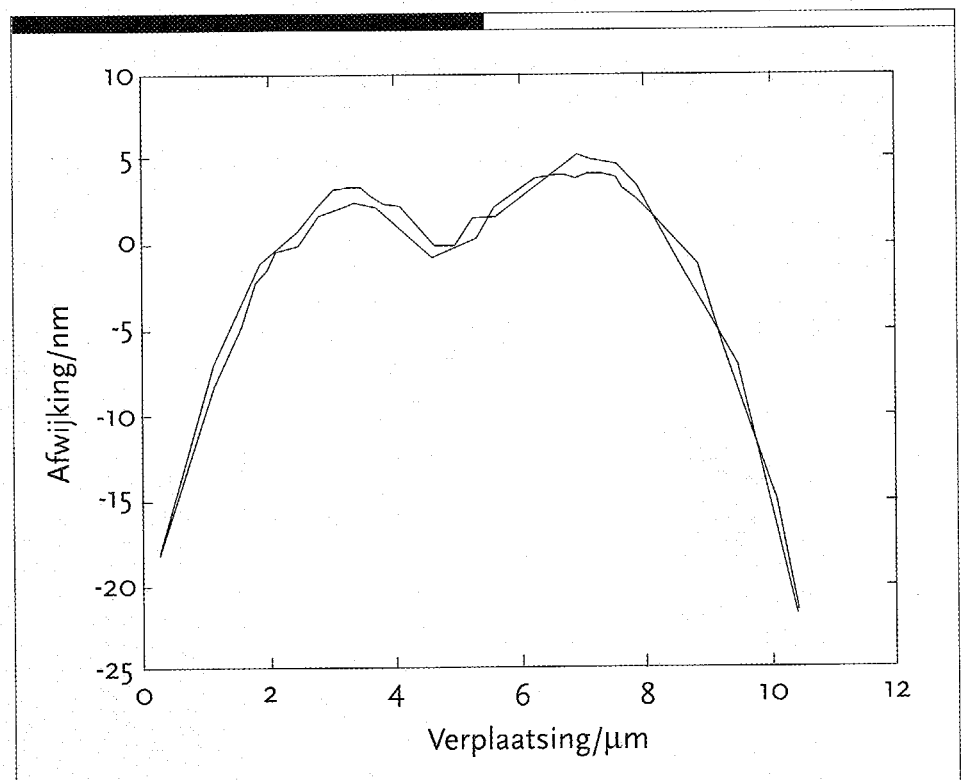
Er is een kalibratieopstelling gerealiseerd waarmee het nu mogelijk is om nanosensoren daadwerkelijk op nanometerniveau te kalibreren. Niet alleen kunnen hierdoor de afwijkingen van de nanosensoren worden vastgesteld, maar kan er ook voor worden gecorrigeerd. Verder levert het inzicht op over het gedrag van sensoren op nanometerniveau, wat ook de mogelijkheid biedt tot verbeteringen van het ontwerp van de sensor.

Informatie

R.H. Bergmans, Afdeling Mechanica,
NMI Van Swinden Laboratorium,
Postbus 654, 2600 AR Delft;
E-mail: rbergmans@nmi.nl
Web-site: www.nmi.nl



FIGUUR 4: afwijking tussen de werkelijke verplaatsing en de aanwijzing van de capacitieve sensor. De meting is heen en terug uitgevoerd.



FIGUUR 5: residu na een kalibratie van de capacitieve sensor na een eerste orde fit over 10 μm heen en terug.