

Werkelijke nauwkeurigheid van meetinstrumenten

Suzanne Cosijns

De limieten van de huidige precisie metrologie neigen naar het (sub)-nanometer niveau met toenemende resolutie. De resolutie van de huidige precisie sensoren, laser interferometers en lineaire meetsystemen bereikt het nanometer en zelfs sub-nm niveau. Hun werkelijke onzekerheid ligt echter ongeveer een factor 10 hoger voor zover deze al bepaald kan worden. Derhalve wordt binnen de sectie Precision Engineering aan de Technische Universiteit Eindhoven middels een IOP (Innovatief Onderzoek Programma) project gewerkt aan een kalibratie-opstelling die de werkelijke onzekerheid van deze sensoren kan bepalen.

Het meten van kleine verplaatsingen kan op een aantal manieren worden gedaan, afhankelijk van het werkingsprincipe van de sensor. Laser interferometrie wordt vaak gebruikt met als voordeel de contactloze meting over grote afstanden (tot 30 m). Omdat elk contact de resultaten kan beïnvloeden is dit een groot voordeel. Verder kunnen capacitieve en inductieve tasters worden gebruikt. Tenslotte bestaan er de lineaire meetsystemen welke vergelijkbaar zijn met een liniaal met sensor die de plaats op de liniaal bepaalt. Alle genoemde meetmethoden zijn in staat om met nauwkeurig-

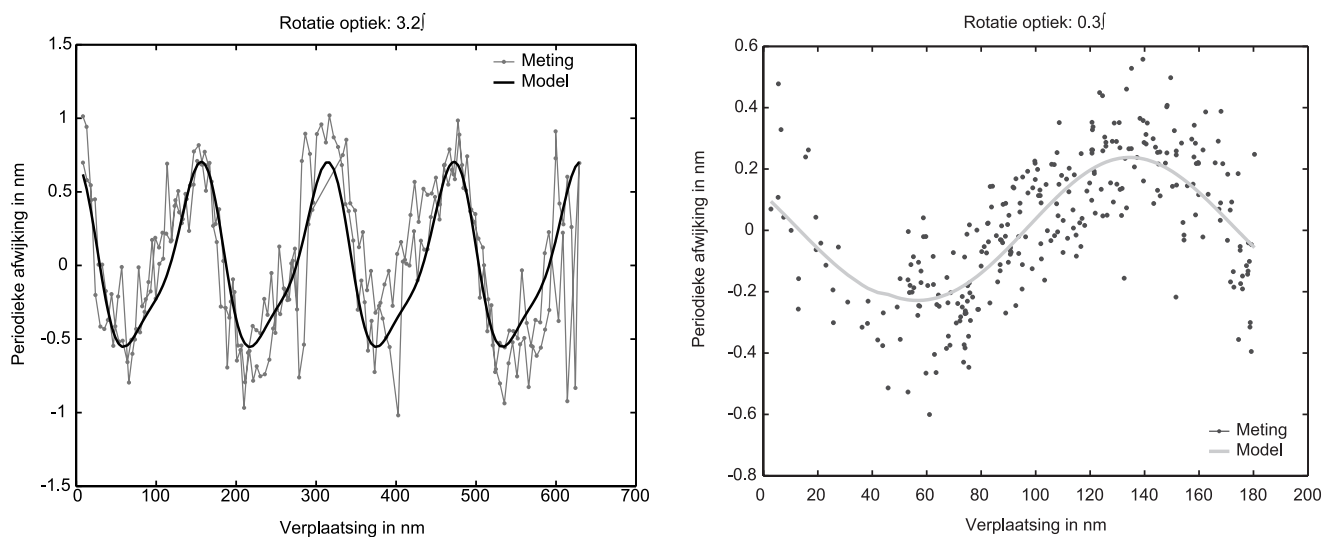
heden van één tot enkele nanometers te meten. Echter moet wel worden gelet op de manier waarop de systemen worden toegepast. Naast afwijkingen ten gevolge van het meten op een onjuiste manier (Abbe-fouten, cosinus-fouten) komen inherent in de meetmethoden ook afwijkingen voor. De afwijkingen die optreden bij laser interferometers en lineaire meetsystemen zijn periodiek en niet-lineair van aard, afhankelijk van het gebruik en de verstoringen van de omgeving.

Het IOP-project bestaat dan ook uit vier delen: Allereerst moest de oor-

zaak van de niet-lineariteiten worden gevonden, en wel zodanig dat de totale niet-lineariteit van interferometers kan worden voorspeld. Vervolgens worden de afwijkingen van lineaire meetsystemen bepaald. Het derde deel bestaat uit het nauwkeurig meten van de brekingsindex van lucht. Dit omdat laser-interferometers een optische weglengte verandering meten welke dus afhankelijk is van de brekingsindex van het medium. Uiteraard kan in vacuüm worden gemeten, in dat geval vervalt deze bron van onzekerheid. Vacuüm toepassingen zijn echter kostbaar en vragen specifieke kennis. Door de brekingsindex van lucht nauwkeurig te meten kan worden gecorrigeerd voor veranderingen. Als laatste deel staat op het programma het herleidbaar kalibreren van meetsystemen met sub-nm nauwkeurigheid.

Laser interferometers

Laser interferometers bestaan uit een laser bron, optiek welke de laser bundel splitst voor een verplaatsingsmeting en een referentiemeting, detectoren voorzien van een polariser om de signalen uit beide metingen te mengen. De splitsing van de bundel is meestal gebaseerd op polarisatie splitsing van de laserbundel. Ten gevolge van niet-ideale uitlijning van compo-



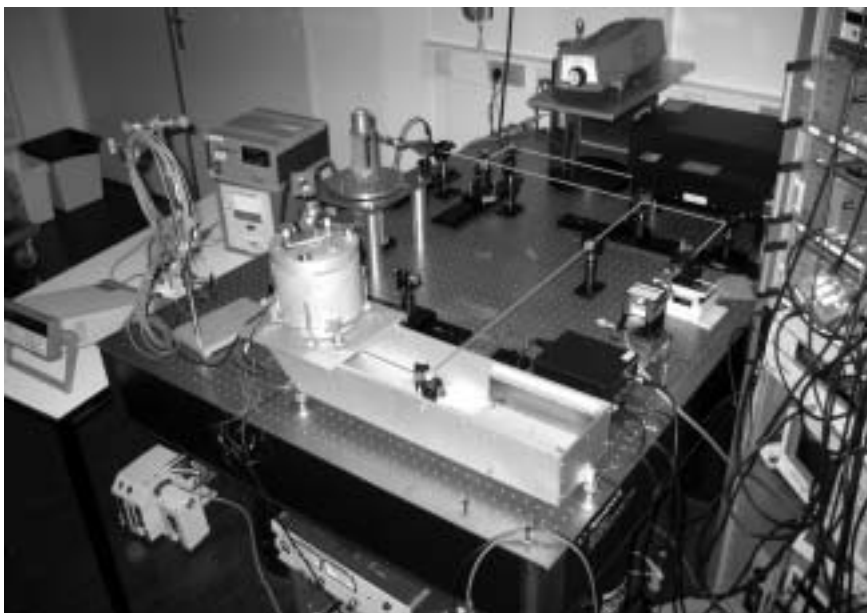
Afbeelding 1. Periodieke afwijkingen gemeten met een herleidbare kalibratie-opstelling vergeleken met de voorspelde periodieke afwijkingen uit het model voor verschillende rotaties van de optiek

nen en afwijkingen in componenten (zoals een niet-ideaal gepolariseerde laserbundel) worden de signalen niet goed gesplitst of niet goed samengevoegd. Als gevolg treden dan periodieke afwijkingen op met een periode gelijk aan een halve (316 nm) of een kwart golflengte (158 nm) per hele golflengte optische weglengte verplaatsing. In afbeelding 1 is hiervan een voorbeeld te zien.

Om deze periodieke afwijkingen te voorspellen is een model ontwikkeld, gebaseerd op Jones matrices. Dit model maakt het ook mogelijk om eventuele afwijkingen in de polarisatie eigenschappen van optiek en laserbron mee te nemen. Dit laatste blijkt noodzakelijk in het voorspellen van de periodieke afwijkingen. Het model is op verschillende manieren getest, waarvan hier genoemd wordt de herleidbare kalibratie opstelling. De polarisatie eigenschappen van de laserhead worden gemeten middels een zelf ontworpen methode. De polarisatie eigenschappen van de gebruikte optiek worden middels

ellipsometrie gemeten. Door deze meetresultaten als input van het model te gebruiken, samen met de gemeten scheefstand van de optiek

worden de periodieke afwijkingen correct voorspeld, zoals in figuur 1 te zien is. De standaard deviatie van het model t.o.v. de metingen bedraagt 0,3



Afbeelding 2. Fabry-Pérot opstelling voor de kalibratie van precisie sensoren. Op de voorgrond de cavity en de slave laser, rechtsachter twee Jodium gestabiliseerde HeNe-lasers (zwarte boxen)



Afbeelding 4. Foto van de kleine Fabry-Perot cavity in de inzet een schematische weergave van het ontwerp

nm. Hiermee is een tool ontwikkeld voor ontwerpers en makers van interferometer systemen waarmee de correcte materialen en samenstellingen kunnen worden geselecteerd.

Lineaire meetsystemen

De nauwkeurigheid van lineaire meetsystemen is afhankelijk van de positionering van de lijnen op de lineaal welke gebruikt worden door de sensor om de positie te meten. Ook de sensor waarmee de positie wordt bepaald en het interpolatie systeem kunnen afwijkingen bevatten. Derhalve is een onafhankelijke kalibratiemethode nodig. Wij gebruiken daarvoor een externe Fabry-Pérot cavity, bestaande uit twee confocale spiegels. Laserlicht van een externe diodelaser wordt in de cavity geleid. Indien de frequentie van het licht past bij de lengte van de cavity treedt constructieve interferentie op en zal licht door de cavity dringen. Dit licht kan dan gebruikt worden in een regelsysteem om de frequentie van de "slave laser" te veranderen, zodanig dat er steeds een staande golf in de cavity aanwezig is. Wanneer nu een van de

spiegels verplaatst wordt, zal de frequentie van de slave laser meeveranderen en wel volgens de volgende relatie:

$$f = \frac{kc}{2nL} \quad \Delta f = \frac{dL}{L} \quad (1)$$

met k het aantal golven in de cavity, c de snelheid van het licht, n de brekingsindex van het medium in de cavity en L de mechanische lengte van de cavity. In de cavity is een vacuumbuis aangebracht om de invloed van de brekingsindex uit te schakelen. De mechanische weglengte verandering wordt dus omgezet naar een frequentieverandering. Deze frequentieverandering is herleidbaar te meten t.o.v. een Jodium gestabiliseerde HeNe-laser (de praktische definitie van de meter). Het systeem bevat een picomotor in serie met een piëzo welke het mogelijk maakt om in stapjes van 0,01 nm een bereik van 300 μm te creëren. De onzekerheid van het systeem over dit bereik is 0,8 nm.

Brekingsindex

Brekingsindex variaties in het medium waardoor met een laser interferometer gemeten wordt zullen de meting direct beïnvloeden daar altijd een optische weglengte verandering gemeten wordt welke een combinatie is van mechanische weglengte verandering en brekingsindex:

$$L_{opt} = n \Delta L_{mect} \quad (2)$$

De meestgebruikte huidige meetmethode is gebaseerd op het meten van 4 parameters van de lucht (temperatuur, druk, luchtvochtigheid en CO_2 -gehalte) en invullen van deze parameters in een empirische formule (Edlén). Middels deze methode is bij gebruik van de nauwkeurigste apparatuur een onzekerheid van $2 \cdot 10^{-8}$ haal-

baar. Dit resulteert in een afwijking van 20 nm per meter ofwel 1 nm per 50 mm.

Een mogelijke verbetering ligt in het direct meten van de brekingsindex. De huidige refractometers halen een nauwkeurigheid vergelijkbaar met de gemodificeerde Edlén vergelijking. Een methode om dit te verbeteren zou zijn het gebruik van een Fabry-Perot cavity. In dit geval wordt echter de mechanische weglengte constant gehouden en mag de brekingsindex vrij variëren. Vergelijking 1 wordt dan:

$$f = \frac{kc}{2nL} \quad \Delta f = \frac{dn}{n} \quad (3)$$

De frequentie verandering is nu direct evenredig met de brekingsindex verandering. Theoretisch is hiermee een onzekerheid van $5 \cdot 10^{-9}$ haalbaar. Daarnaast is de resolutie waarmee gemeten kan worden veel. Voor de realisatie van een constante mechanische weglengte is een zero-dur cavity gerealiseerd.

(Sub-)nanometer verplaatsingen

Zoals reeds besproken is er in een eerder promotie onderzoek binnen de groep Precision Engineering een Fabry-Perot cavity gerealiseerd voor kalibraties met een slag van 300 μm en een nauwkeurigheid van 1 nm. De grootste bron van afwijking bleek hier uitzetting en gradiënten ten gevolgen van de relatief grote cavity te zijn. Om de nauwkeurigheid te verbeteren en de gevoeligheid te vergroten is een cavity ontworpen met een lengte van 24 mm in plaats van 110 mm. De slag is 3 μm en de beoogde nauwkeurigheid 0,5 nm. In figuur 4 is een weergave van de cavity te zien.