

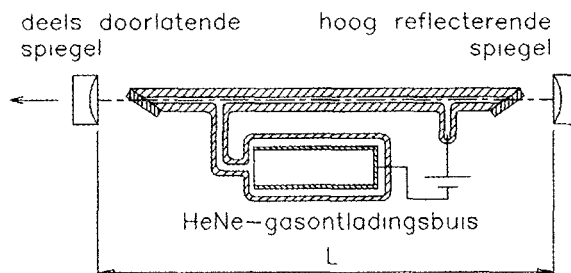
Kalibreren op nanometerniveau

De meetlaser

Serge Wetzels

In de precisie-meettechniek probeert men alsmaar de grenzen te verleggen van wat meetbaar is. Met opnemers gebaseerd op capacitieve of inductieve principes is het mogelijk ongelofelijke resoluties te bereiken, denk bijvoorbeeld aan ruwheidstasters en AFM (Atomic Force Microscope)-tasters. Lengtes in de orde van atoomafstanden zijn al meetbaar. De vraag blijft echter wat men nu precies meet, en hoe de microvolts of microampères die deze opnemers afgeven te vertalen zijn naar een meetwaarde in millimeters, micrometers of nanometers. Om dit te achterhalen is een kalibratieprocedure noodzakelijk. Het instrument dat dit mogelijk maakt, de meetlaser, wordt hier beschreven.

Bij een kalibratie moet op twee zaken worden gelet: de herleidbaarheid en de nauwkeurigheid van de procedure. Herleidbaarheid houdt in dat een kalibratie eenduidig is terug te voeren naar de standaard, en resultaat van een kalibratie moet uit te drukken zijn in een afwijking ten opzichte van de standaard. Voor lengtemetingen is de standaard sinds 1983 gedefinieerd als de golflengte van een jodiumgestabiliseerde helium-neon (HeNe)-laser. Alle lengtemeetinstrumenten zijn, indien ze herleidbaar zijn, via één of meer kalibraties terug te voeren naar deze standaard. Het tweede aspect waar bij een kalibratie op gelet moet worden is de nauwkeurigheid. De opbouw en uitvoering van de procedure moeten zodanig zijn dat er een zinnige uitspraak gedaan kan worden over de te verwachten nauwkeurigheid van het instrument. De standaard waartegen gekalibreerd wordt is daarbij altijd nauwkeuriger dan het instrument dat gekalibreerd wordt, aangezien elke vergelijkingsmeting meetfouten met zich meebrengt. Hieruit volgt dat een kalibratie nauwkeuriger is naarmate minder meetstappen tussen de standaard en het te kalibreren instrument aanwezig zijn. Het beste zou daar-



Figuur 1 Schematische weergave van een laserresonator

om een directe kalibratie tegen de laserlengtestandaard zijn. Dit wordt echter bemoeilijkt doordat de standaard de vorm heeft van een lichtbron met een vaste golflengte, terwijl lengtemeetinstrumenten verplaatsingen meten. Een directe koppeling is daardoor niet mogelijk.

Om toch zo direct mogelijk deze koppeling te kunnen maken is een kalibratieinstrument ontworpen: de meetlaser.

Het basisprincipe

Doel van de meetlaser is het mogelijk maken van kalibraties met subnanometerresolutie over een bereik van $10 \mu\text{m}$. Ten grondslag aan dit instrument ligt de HeNe-laser.

In figuur 1 is schematisch de opbouw van een HeNe-laser weergegeven. De laser bestaat uit een laserbuis en twee spiegels. De laserbuis is gevuld met de gasen helium en neon, welke onder invloed van een gasontlading licht uitzenden. De spiegels vormen een resonator waarin een deel van het uitgezonden licht gevangen en versterkt wordt. Doordat één van de spiegels deels doorlatend is, kan de resonator licht uitzenden.

De versterking in de laser is van een bijzondere soort omdat fase, richting en frequentie van het licht behouden blijven. In de resonator, met lengte L , is het licht daarom te beschouwen als een staande golf waarvan de knooppunten zich op de spiegels bevinden. Voor de golflengte geldt dan het volgende verband:

$$L = k \cdot \lambda / 2$$

Binnen de resonatorlengte bevinden zich een geheel aantal, k , halve golflengtes $\lambda/2$. Voor de frequentie f van de laser volgt dan:

$$f = k \cdot c / (2 \cdot L) \quad (1)$$

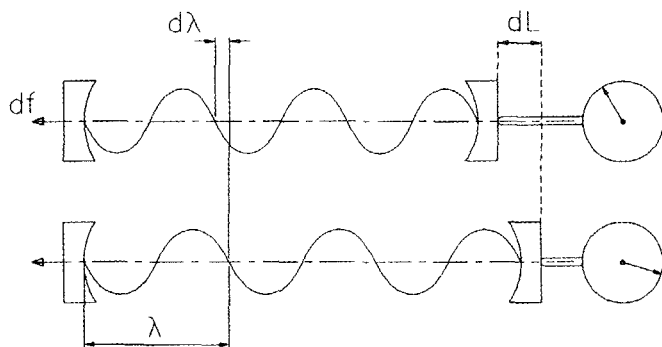
Hierbij is gebruik gemaakt van de relatie $f \cdot \lambda = c$.

Indien de resonatorlengte verandert, past de golflengte zich aan opdat de golf nog steeds tussen de spiegels past. Het verband tussen de verandering van de resonatorlengte dL en frequentieverandering df is uit vergelijking 1 af te leiden en luidt:

$$df / f = - dL / L \quad (2)$$

Er bestaat een lineair verband tussen frequentie en resonatorlengte. Aan de hand van de meting van de frequentieverandering is het dus mogelijk de verandering van de resonatorlengte te bepalen. Dit verband geldt voor elke laser. In de meetlaser wordt hiervan echter bewust gebruik gemaakt om een instrument te kalibreren, zoals in figuur 2 wordt getoond.

De resonatorlengte wordt veranderd door één van de spiegels te verplaatsen, bijvoorbeeld met een piezoactuator. Deze verplaatsing kan dan gemeten worden door het te kalibreren instrument, en wordt vergeleken met de optredende frequentieverandering. Dankzij de zeer hoge frequentie van de laser van $4.7 \cdot 10^{14}$ Hz zijn de frequentieveranderingen ook zeer groot. Uit vergelijking 2 volgt dat een laser met een resonatorlengte van 100 mm, per nm spiegelverplaatsing 5 MHz frequentieverandering geeft. Met een kleinst meetbare frequentieverandering van 100 kHz is aldus een resolutie in de lengtemeting mogelijk van $0,02 \text{ nm}$!



Figuur 2 Koppeling van frequentieverandering aan spiegelverplaatsing

De meetopstelling

De gehele meetopstelling is in figuur 3 weergegeven. De uitlezing van de, in dit geval, te kalibreren sensor wordt met de frequentieverandering van de meetlaser vergeleken. Om de frequentie van de meetlaser te kunnen meten wordt deze met de bekende en uiterst stabiele frequentie van een jodiumgestabiliseerde HeNe-standaardlaser gemengd. Uit dit mengsignaal is dan de verandering van de frequentie van de meetlaser te bepalen met behulp van een fotodiode en een frequentieteller. Door het opnemen van de lengtestandaard in de meetopstelling is de meting direct herleidbaar naar deze standaard.

De constructie

Zoals in het voorgaande is uitgelegd wordt aan de hand van een frequentiemeting berekend wat de verplaatsing van de meetspiegel is, welke ook door het te kalibreren instrument wordt gemeten. Het is daarom van groot belang dat de frequentie alleen verandert door

verplaatsing van de meetspiegel en niet door andere oorzaken zoals drift van de resonatorconstructie. Aangezien gestreefd wordt naar een meetnauwkeurigheid van beter dan één nanometer, moet de stabiliteit van de constructie ook van een dergelijk hoog niveau zijn (binnen een meetduur van enkele minuten). Hierbij is vooral de afstand tussen de twee laserspiegels van belang omdat deze de laserfrequentie bepaalt. Uitzettingseffecten moeten minimaal blijven. In het exploded view van figuur 4 wordt getoond hoe dit is bereikt.

De laserbuis is centraal in een aluminiumcilinder (\varnothing 200 mm) gemonteerd. De laserbuis dissipeert een vermogen van ongeveer 8 W. Door de goede geleiding van het aluminium wordt deze warmte gelijkmatig over de constructie verdeeld zodat temperatuurgradienten, die vervorming van de constructie veroorzaken, minimaal zijn. De grote warmtecapaciteit van de cilinder zorgt voor een traag verloop van eventuele temperatuurvariaties waardoor een stabiele situatie gedurende de metingen gewaarborgd is. Om een goede warmte-

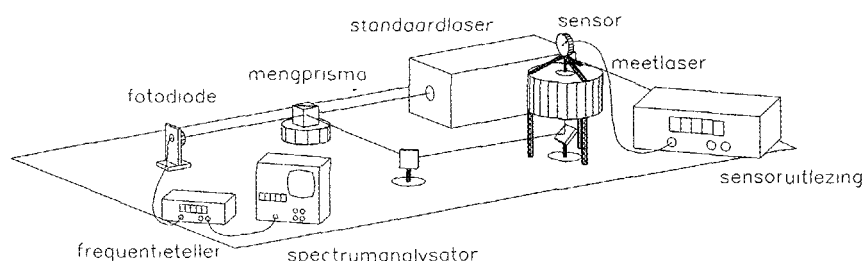
overdracht tussen laserbuis en cilinder te verkrijgen, is de ruimte tussen buis en cilinder gevuld met transformatorolie.

Aan de onder- en bovenkant van de cilinder bevinden zich de instelmechanismen voor de laserspiegels. De laser kan namelijk alleen functioneren indien de spiegels zeer nauwkeurig ($\pm 10^{-5}$ rad) op elkaar zijn uitgericht. Voor dit doel zijn elastische instelmechanismen ontworpen waarmee beide spiegels om twee loodrechte assen over een hoek van 9 millirad instelbaar zijn. De bediening geschiedt met differentiaalschroeven met een effectieve spoed van 0,07 mm. Beide instelmechanismen worden op afstand gehouden door drie zerodurstaaven. De mechanismen zijn van aluminium waardoor thermische vervorming minimaal zal blijven. Met het oog op uitzetting van deze mechanismen is ervoor gezorgd dat de spiegels in hetzelfde vlak zijn gemonteerd als de oplegpunten voor de zerodurstaaven. Dit is bereikt door de instelmechanismen uit twee delen op te bouwen waarbij het ene deel een gelijke uitzetting vertoont als het andere, echter in tegengestelde richting, waardoor de uitzettingen elkaar compenseren.

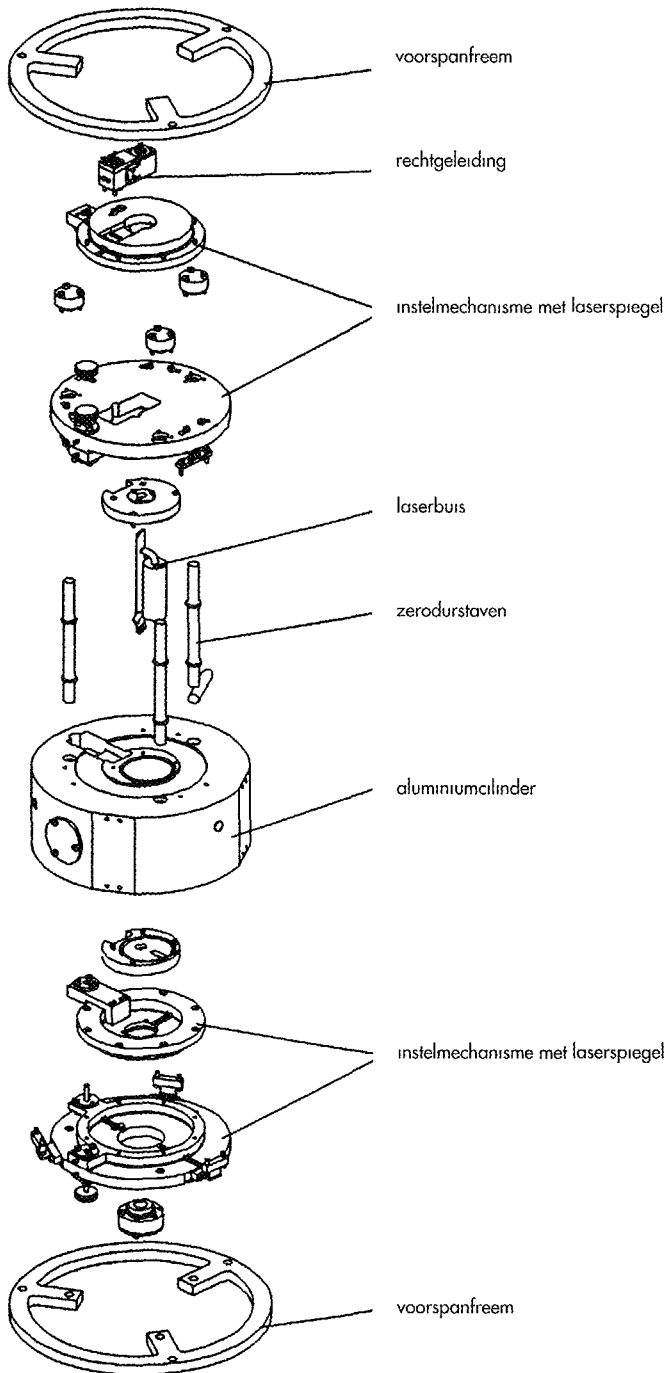
In het bovenste instelmechanisme is een rechtgeleidingsmechanisme gemonteerd dat de meetspiegel geleidt over een slag van $10 \mu\text{m}$. De geleiding bestaat uit een parallellogrammechanisme met elastische scharnieren en wordt aangedreven door een piezoactuator.

Essentieel in dit ontwerp is het op afstand houden van de twee laserspiegels. Zerodur is hiervoor een zeer geschikt materiaal vanwege de lage uitzettingscoëfficiënt. Het is echter duur, moeilijk te bewerken en heeft een slechte warmtegeleiding. De beste manier om het toe te passen is danook in de vorm van staaven. Het probleem bij de keuze voor zerodur is echter de koppeling met de rest van de constructie, omdat het grote verschil in uitzetting tussen zerodur en de overige constructiematerialen een stabiele klemming zeer moeilijk maakt. Daarom is gekozen voor een oplegging van de staaven op kogels, die in de instelmechanismen zijn aangebracht. Elke oplegging legt echter maar één vrijheidsgraad vast, waardoor de afstand tussen beide instelmechanismen wel

Figuur 3 Overzicht van de kalibratiemeetopstelling



Figuur 4 Overzicht van de meetlaser



vastligt, maar de constructie nog niet bepaald is. De instelmechanismen aan weerszijde van de cilinder zijn daarom met behulp van bladveren aan de cilinder verbonden. Het bovenste mechanisme is via drie ingesnoerde bladveren volledig in 6 vrijheidsgraden aan de cilinder verbonden, het onderste mechanisme is via drie omgevouwen bladveren met de cilinder verbonden. Hierdoor zijn slechts drie graden van vrijheid vastgelegd. De overblijvende drie worden vastgelegd door de drie zerodurstaafjes die tussen de beide instelmechanismen zijn geklemd. De voorspanning voor de klemming wordt verzorgd door twee freems met veren ertussen

Samenvattend kan worden gesteld dat door het gebruik van zerodurstaafjes in combinatie met een aluminiumconstructie met bladveren is getracht het beste van twee werelden te combineren: enerzijds de axiale stijfheid en stabiliteit van de zerodurstaafjes, anderzijds de stijfheid van de bladveren in de overige richtingen en de goede geleiding van het aluminium.

De meetlaser wordt op het ogenblik vervaardigd bij de CTD van de Technische Universiteit Eindhoven en zal in februari 1995 gereed zijn. Dan kan met de experimenten begonnen worden en zal moeten blijken hoe nauwkeurig dit instrument werkelijk is.

Noot

Ir. S.F.C.L. Wetzels is werkzaam als promovendus op de Technische Universiteit Eindhoven in de groep Precision Engineering van prof. dr. ir. P.H.J. Schellekens