

Laserinterferometrie : mogelijkheden en beperkingen

Citation for published version (APA):

Schellekens, P. H. J. (1991). Laserinterferometrie : mogelijkheden en beperkingen. *MB Produktietechniek*, 57(5), 162-170.

Document status and date:

Published: 01/01/1991

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of Record (includes final page, issue and volume numbers)

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Laserinterferometrie

Mogelijkheden en beperkingen



Dr. ir. P. Schellekens
Laboratorium voor Geometrische
Meettechniek TU-Eindhoven.

Laserinterferometers worden op talrijke gebieden van de geometrische meettechniek ingezet. Met name voor kalibratiedoeleinden stelt dit hoge eisen aan dit meetinstrument. In deze bijdrage worden de principes en de toepassingen behandeld, waarbij de nadruk ligt op de nauwkeurigheid en op welke wijze de beste resultaten kunnen worden bereikt. De kalibratie van laserinterferometers wordt beschreven zoals deze bij de TU Eindhoven wordt uitgevoerd.

1. Inleiding

De interferometrie kent in zijn ontwikkeling drie perioden die bepalend zijn geweest voor de huidige positie als de belangrijkste techniek voor nauwkeurige geometrische metingen. Deze perioden zijn:

- Rond 1900 toen Adam Michelson deze techniek voor het eerst toepaste voor nauwkeurige lengtemetingen;
- Na 1961, toen de gaslaser als lichtbron werd geïntroduceerd voor interferometers;
- Na 1980, toen de microcomputers zo ver waren ontwikkeld dat ze als draagbaar gegevensverwerkingssysteem voor laserinterferometers konden worden ingezet.

De huidige laserinterferometers zijn opgebouwd uit de volgende drie hoofdcomponenten: de laserlichtbron, het optisch systeem en de gegevensverwerking. De laserlichtbron met het optisch systeem is het eigenlijke meetgedeelte waarmee lengtemetingen, hoekmetingen, rechtheidsmetingen en afgeleide metingen worden uitgevoerd. Tot deze afgeleide metingen behoren het meten van vormen, ruwheid, uitzettingscoëfficiënten van vaste stoffen en de brekingsindex van lucht.

Michelson heeft al aangegeven dat de toenmalige lichtbronnen hun beperkingen hadden wat betreft de effectieve meetlengte en de beheersbaarheid van de golflengte van het licht [3]. De komst van de gaslaser veranderde dit: er kon nu een effectieve meetlengte van meer dan 30 m worden bereikt terwijl de golflengte van deze laser met speciale middelen kon worden gestuurd en beheerst.

Het aanzien van de huidige laserinterferometer als precisie-instrument wordt mede bepaald door de toepassing van verbeterde elektronica, waarmee de intensiteitswisselingen tijdens het meten kunnen worden vastgelegd. De diverse optische componenten en hulpmiddelen en de gekoppelde microcomputer ten behoeve van de gegevensverwerking versterken dit aanzien. De opbouw van de moderne interferometer is hier schematisch weergegeven (figuur 1).

De laserlichtbron, een He-Ne laser, zendt een voor het oog zichtbare straal uit naar de bundeldeler BD die deze opsplijst in twee bundels van nominaal gelijke intensiteit. Een bundel reflecteert aan de referentiespiegel S_1 en de andere, de meetbundel, reflecteert aan de meetspiegel S_2 . De bundels komen weer bijeen in het prisma BD waar interferentie optreedt. Na het prisma wordt deze interferentie met de detector D als intensiteitswisselingen geregistreerd indien met spiegel S_2 een verplaatsing in de interferometer wordt gerealiseerd. Deze verplaatsing Δl wordt via de detector als

een uitgangsspanning weergegeven die voldoet aan:

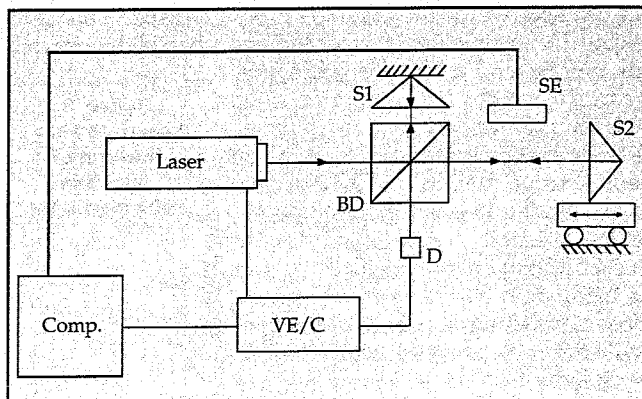
$$V(\Delta l) = V_0 \cdot (A + B \cdot \cos 4\pi \cdot \Delta l / \lambda) \quad (1)$$

A en B zijn constanten en λ is de laser-golflengte

Het signaal wordt door de verwerkingseenheid VE vastgelegd waarna met de computer de benodigde bewerkingen c.q. berekeningen worden uitgevoerd. De sensoren SE meten de luchtcondities waaruit de juiste golflengte kan worden berekend. Met VE/C wordt ook de lasergolflengte bestuurd.

De interferometer kan wat inrichting betreft worden onderscheiden volgens de amplitude- of polarisatiedeling. Bij de amplitudedeling wordt de intensiteit in de bundeldeler gesplitst over de twee bundels, bij de polarisatiedeling wordt de straling in twee bundels met orthogonale, lineaire polarisatie opgesplitst [1]. Bij enige typen interferometers zijn twee frequenties, en dus twee golflengten, in de bundel aanwezig die orthogonaal, lineair gepolariseerd zijn en door een polarisatiedeling worden gesplitst [5,10]. Door de twee frequenties kan een draaggolf worden gegenereerd die het mogelijk maakt de signalen van de interferometer eenvoudiger te verwerken. Dit kan echter ten koste van de meetsnelheid gaan. Zoals al is opgemerkt dient de door de laser uitgezonden golflengte bekend te zijn en zo goed als mogelijk constant [4]. Daartoe is de laser voorzien van een ingebouwd regelsys-

Figuur 1
Schema van een laserinterferometer



teem (paragraaf 3), dat zorgt voor een golflengtestabilisatie. De verwerkings-eenheid geeft na meting van een verplaatsing een waarde Δl uit die berekend is volgens:

$$\Delta l = (k+a) \cdot \lambda_v / p \quad (2)$$

Hierin geven k en a het aantal golflengten resp. de golflengtefractie aan ($0 < a < 1$), terwijl p een factor is die van de inrichting van de interferometer afhangt. De lasergolflengte in lucht is aangegeven met λ_v . Uit formule (2) kunnen in een later stadium de condities voor precisemetingen worden afgeleid.

2. Uitvoeringen

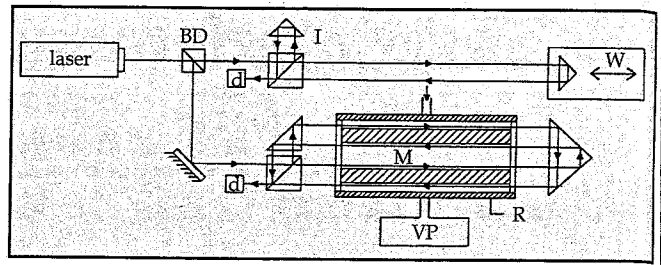
Sinds de introductie van de laserinterferometer zijn er zeer veel toepassingen ontwikkeld. Deze zijn onder te verdelen in een groep basismetprincipes -die men tegenwoordig in alle commercieel verkrijgbare interferometers aantreft- en een specifieke groep die voor speciale toepassingen is ontwikkeld, soms ook door gebruikers van de apparatuur. De laatste groep is inmiddels zo groot geworden dat hier slechts een paar uitvoeringen kunnen worden besproken.

De basismetprincipes zijn als volgt onder te verdelen:

- snelheids- en lengtemetingen;
- hoekmetingen;
- rechtheidsmetingen.

Bij desnelheids- en lengtemetingen past men de basisprincipes van de interferometer toe zoals dat in figuur 1 is geschetst. Een van de spiegels wordt daarbij evenwijdig aan de bundelrichting verplaatst, terwijl de andere spiegel gefixeerd staat. Vermeld zij dat ook beide spiegels verplaatst kunnen worden. Daarbij wordt dan uiteraard het snelheids- of lengteverschil gemeten. De snelheid kan worden verkregen door bij verplaatsingen het aantal intensiteitswisselingen per tijdseenheid te registreren en dit te vermenigvuldigen met de golflengte waarde in het medium waarin men meet, meestal lucht. De verplaatsing wordt uit formule (2) berekend. De juiste golflengte waarde dient ook hier bekend te zijn. De golflengte waarde λ_v wordt bepaald door de, door de laser uitgezonden, vacuüm golflengte en de brekingsindex van lucht. Voor nauwkeurige metingen is dit een probleem omdat de laserinrichting de vacuüm golflengte bepaalt maar ook de luchtcondities en de samenstelling van de lucht, de brekingsindex vastleggen. De samenstelling van de lucht wordt bepaald door de mate van verontreiniging, en dus door de mens! In een gesloten

Figuur 2
Laserinterferometer met gekoppelde refractometer



omgeving bijvoorbeeld zal door de aanwezigheid van mensen het CO₂-gehalte aanzienlijk kunnen toenemen.

Laserinterferometers behoren dan ook uitgerust te zijn met middelen om de belangrijkste invloedsfactoren te kunnen waarnemen. Een redelijke benadering van de veranderingen in golflengte van de lucht kan dan worden bepaald. Men dient hiertoe altijd (zie paragraaf 3) de luchttemperatuur, de luchtdruk en de luchtvochtigheid te meten terwijl het in gesloten omgevingen raadzaam is ook het CO₂-gehalte te bepalen.

Een betere methode is het rechtstreeks meten van de brekingsindex van de lucht daar men dan integraal alle invloeden meeneemt. Deze meting kan worden uitgevoerd met een interferentie-refractometer: een interferometer voor het meten van de brekingsindex van gassen. Een uitvoering van een laserinterferometer met gekoppelde refractometer, zoals deze op de TUE is ontwikkeld, is geschetst in figuur 2.

De interferometer I is van het type met frequentiedeling en bepaalt hier het aantal intensiteitswisselingen tijdens de verplaatsing van de wagen W. De refractometer is van hetzelfde interferometertype doch het bundelpatroon is geheel verschillend. Eén van de bundels, de referentiebundel, wordt door vacuümkanalen geleid terwijl de andere bundel, de meetbundel, door een meetcel M, gevuld met lucht uit de interferometer, wordt geleid. Bij aanvang van het meetproces dient de meetcel te worden geëvacueerd. De absolute waarde van de brekingsindex N kan bepaald worden uit de relatie:

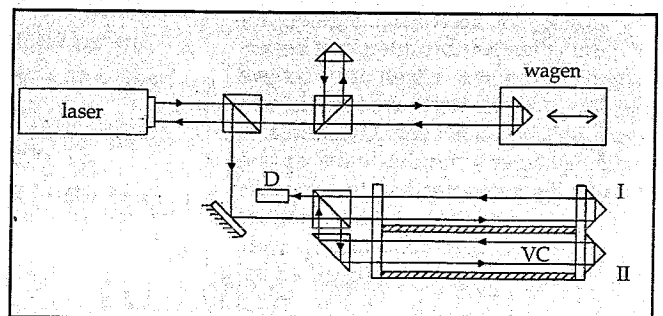
$$N = 1 + k \cdot \lambda_v / (l \cdot p) \quad (3)$$

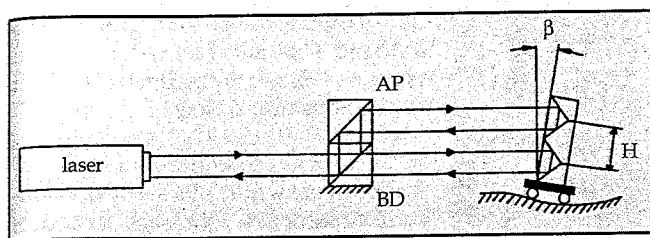
Hier is λ_v de vacuüm golflengte van de laser, l de lengte van de meetcel en p een gevoeligheidsfactor. K is weer het aantal intensiteitswisselingen, nu tijdens de overgang van vacuüm naar lucht in de meetcel. Het is van groot belang dat men in de meetcel continu dezelfde luchtcondities heeft als in de interferometer waar men de brekingsindex wil bepalen. Zo is een onnauwkeurigheid $dN/N < 5 \cdot 10^{-8}$ te bereiken.

Naast de hier beschreven absolute refractometer zijn er ook nog relatieve refractometers ontwikkeld die vanaf een zeker instelpunt de brekingsindexvariaties registreren, echter de absolute nauwkeurigheid wordt natuurlijk bepaald door de nauwkeurigheid van het instelpunt. In figuur 3 is de opbouw van een interferometer met relatieve refractometer geschetst. De refractometer bezit een vacuümcel VC en een open meetruimte van dezelfde lengte. De werking kan dezelfde zijn als hiervoor beschreven, behalve bij aanvang, als de meetcel reeds lucht bevat en deze als referentie dient. De brekingsindex bij het instelpunt wordt met conventionele middelen bepaald. Ook bij dit type refractometer is het belangrijk dat in de meetcel dezelfde condities heersen als in de interferometer waarmee de metingen worden uitgevoerd. Vooral temperatuursgradiënten komen veel voor; ter compensatie is bij de TUE-refractometer een temperatuurmetsysteem ingebouwd.

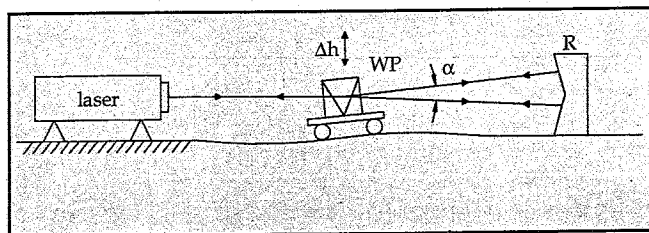
Bij hoekmetingen met de laserinterferometer worden meet- en referentiebundel parallel en, zo mogelijk met

Figuur 3
Laserinterferometer met relatieve refractometer





Figuur 4 Laserinterferometer voor hoekmetingen



Figuur 5 Laserinterferometer voor rechtheidsmetingen

gelijke optische lengte, ingesteld. Lengteverschillen die in de bundels optreden kunnen dan, met de bekende bundelafstand, tot hoekverschillen worden omgerekend. Een veel toegepaste uitvoering is schematisch weergegeven in figuur 4. Hier is de optische lengte in de bundels niet gelijk waardoor deze uitvoering gevoelig is voor omgevingsinvloeden.

Het meetprincipe is simpel: het prisma BD splitst de laserbundel waarna het afbuigprisma AP zorgt voor de parallelle bundels. De spiegels S, gemonteerd in een blok, reflecteren deze weer naar het prisma BD waar de interferentie optreedt. Treden bij het verplaatsen van het blok in de bundelrichting geen rotaties op dan wordt in de interferometer geen wegverschil gemeten. Treden de rotaties (kleine hoeken) wel op dan geeft de interferometer deze uit in een hoekmaat. Een voorwaarde voor een betrouwbare hoekmeting is dat de bundels zuiver parallel lopen daar anders een extra, lengte-afhankelijke hoekafwijking wordt geïntroduceerd die berekend kan worden met formule (4):

$$\delta\beta = 1. \alpha^2 / 2.H \quad (4)$$

Hier is α de hoek tussen de bundels, l de lengte waarover de spiegels zijn verplaatst tijdens de hoekmeting en H is de afstand tussen de spiegels. Dit levert bij gangbare afmetingen bij een hoek $\alpha = 10'$ reeds een afwijking van $18''$ per meter meetlengte. Dat is vooral van belang bij inspectie van machines. Ook mogen de temperatuurverschillen in de bundels niet te groot zijn. De resolutie voor hoekmetingen ligt meestal onder $0,1''$, de absolute onnauwkeurigheid ligt een stuk hoger.

In de volgende paragraaf zal nog nader worden ingegaan op de nauwkeurigheid. Er zijn behalve het in figuur 4 gegeven concept nog varianten ontwikkeld waarbij de laatste werkt met een vlakke eindspiegel en bundels die meerdere keren de meetweg doorlopen waardoor een hoge resolutie wordt bereikt bij een klein meetbereik.

Bij de hier bedoelde rechtheidsmeting met de laserinterferometer wordt steeds gebruik gemaakt van twee meetbundels waarin het optisch weglengteverschil dat bij deze metingen optreedt wordt omgerekend naar rechtheidsafwijkingen loodrecht op de bundelrichting. De meting wordt uitgevoerd met behulp van een optisch element dat bij een rechtheidsafwijking een weglengteverschil tussen de bundels veroorzaakt.

Het meest bekende element is een speciale vorm van het Wollastonprisma dat werkt als een polarisatiedeler, echter nu zodat de bundels een kleine hoek, $1-2^\circ$, met elkaar maken. Verder werkt de interferometer op dezelfde manier als in het voorgaande met dien verstande dat het weglengteverschil nog moet worden omgezet in een rechtheidsafwijking. Een bekend basisschema van dit type meting is weergegeven in figuur 5.

De vlakke reflector R dient vast te worden opgesteld terwijl het prisma WP als rechtheidssensor wordt gebruikt; de wegverschillen ontstaan dan ook in dit element bij verplaatsingen in de aangegeven richting.

Voor dit type meting wordt gebruik gemaakt van een laserbundel die twee orthogonaal, lineair gepolariseerde componenten bevat of een lineair gepolariseerde bundel die onder 45° op het Wollastonprisma invalt. Het verband tussen de rechtheidsafwijking Δh en het gemeten wegverschil Δl wordt gegeven door formule 5.

$$\Delta h = \Delta l / 2. \sin(\alpha/2) \quad (5)$$

In principe is het ook mogelijk de spiegel R als rechtheidssensor te gebruiken echter dit kan alleen als daarbij geen kantelingen van R optreden hetgeen bij

verplaatsingen meestal het geval is. Door de bundelhoek α is de meetlengte beperkt, deze wordt daarbij bepaald door de afmetingen van R.

Het is mogelijk het Wollastonprisma te vervangen door een meetprisma (figuur 6) dat als wig wordt gebruikt [1].

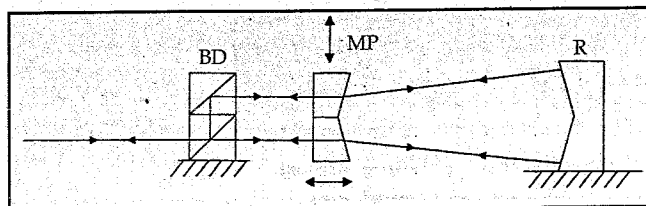
De resolutie van de rechtheidsinterferometer kan $0,01 \mu m$ zijn, de absolute onnauwkeurigheid is veel groter en hangt af van de meetopstelling en gradiënten in de lucht. Hierdoor kunnen aanzienlijke fluctuaties in de meetresultaten optreden.

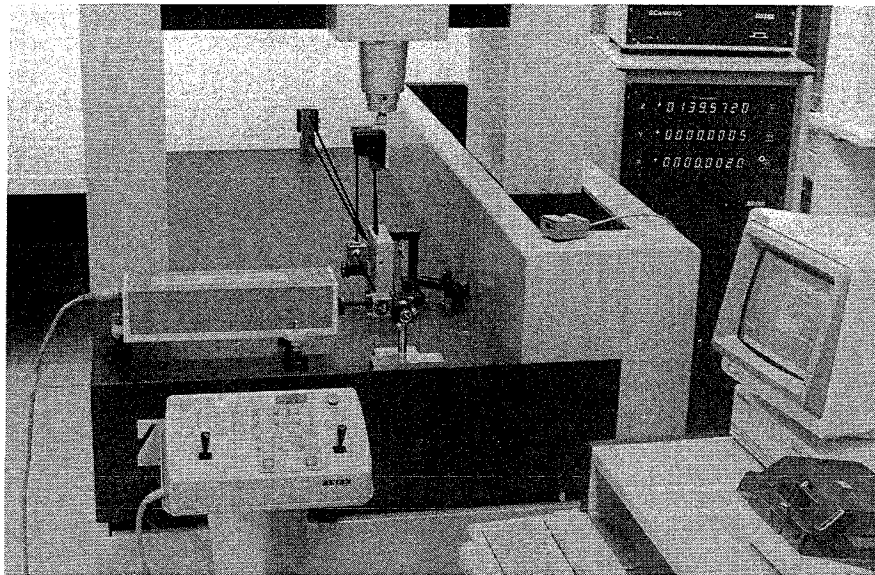
Figuur 7 geeft een voorbeeld van een praktische toepassing van de laserrechtheidsmeting bij de kalibratie van een 3D-meetmachine. Hier worden de rechtheid van twee assen alsmede de haaksheidsafwijking tussen deze assen gemeten.

Overige toepassingen

Naast de hoofdtoepassingen kan de laserinterferometer worden gebruikt voor het meten van ruwheid, vormen, trillingen, versnellingen etc. [8, 9]. Hierbij is steeds sprake van een modificatie van een interferometertype waarbij soms de gegevensverwerking een grote rol speelt. De kwaliteit van het meetresultaat wordt immers voor een groot deel bepaald door de kwaliteit van de toegepaste software. Ook steeds belangrijker wordt de laserinterferometer als kalibratie instrument voor meet- en produktiemachines en robots. Een groot deel van de geometrische afwijkingen die in deze machines optreden door niet-perfecte geleidingen kunnen met de laserinterferometer worden gemeten. Het gaat hier voornamelijk om rechtheidsafwijkingen, positie-afwijkingen, rotatie-afwijkingen en haaksheidsafwijkingen.

Figuur 6 Rechtheidsmetingen met behulp van een homogeen meetprisma (MP)



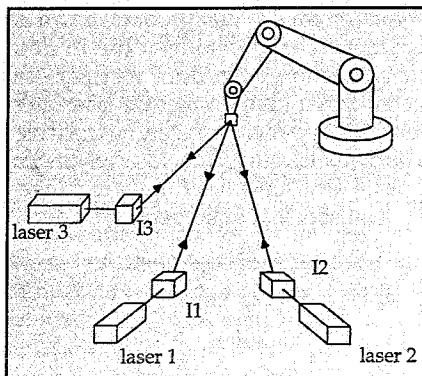


Figuur 7 Rechtheidsmetingen aan een 3D-meetmachine

Elke slede bezit een positie-afwijking, twee rechtheidsafwijkingen, drie rotatie-afwijkingen en haaksheidsafwijkingen ten opzichte van de andere sleden. Bij drie orthogonale geleidingen, zoals bij de meeste meetmachines, levert dit totaal 21 afwijkingen waarvan er 19 met de laserinterferometer kunnen worden gemeten. De overige twee afwijkingen, rotaties om de meetas, worden met elektronische waterpassen gemeten [7]. Op de TUE is een softwarepakket ontwikkeld dat de laserinterferometer koppelt aan een computer, de gegevens binnenhaalt en verwerkt. De meetgegevens, kunnen na te zijn bewerkt, grafisch worden gepresenteerd [6].

Controle robotgedrag

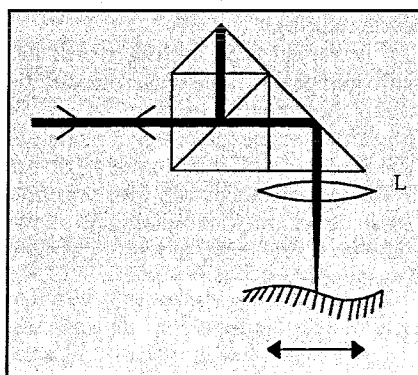
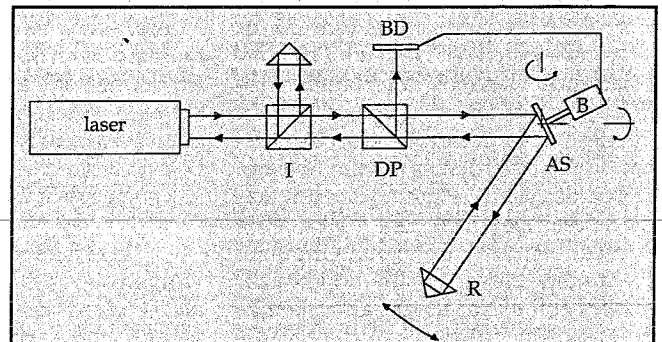
Ook bij het meten van het gedrag van robots wordt steeds meer van laserinterferometers gebruik gemaakt. Hier gaat het weliswaar niet zozeer om de hoge meetnauwkeurigheid doch om de mogelijkheid om over grote afstand



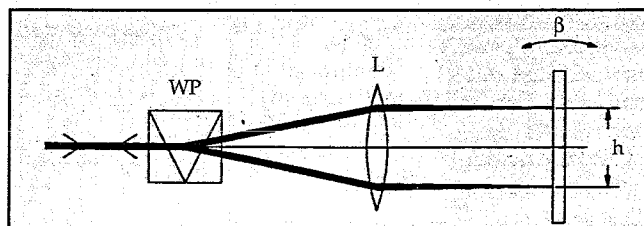
Figuur 8 Meetopstelling voor de controle van robotgedrag

contactloos te kunnen meten. Om bijvoorbeeld het positioneringsgedrag van robots te meten kan een meetopstelling worden gerealiseerd met meerdere in-

Figuur 9 Laserinterferometer voor robot volgsystemen



Figuur 10 Optische meting van verplaatsingen op microstructuren: meten van ruwheid en vorm



Figuur 11 Optische meting van verplaatsingen op microstructuren: meten van microrotaties

terferometers die gericht zijn op de robothand waaraan een reflector is gemonteerd. Figuur 8 geeft een schema van de meetopstelling weer.

In deze opstelling bezitten de interferometers I1 t/m I3 -naast de gebruikelijke optiek voor lengtemetingen- ook nog over een volgsysteem waardoor de meetbundel van elke interferometer steeds op de juiste wijze op de reflector blijft gericht. Uit de gemeten lengteveranderingen ten opzichte van een referentiepunt kan nu voor elke robotpositie de werkelijke waarde worden vastgesteld. Een dergelijke interferometer is schematisch weergegeven in figuur 9.

De meetbundel wordt hier via een deelprisma DP naar de afbuigspiegel AS geleid die de bundel op de reflector gericht houdt. Dit wordt uitgevoerd door een deel van de gereflecteerde bundel naar de positiedetector BD te leiden die daarop een positie afhankelijk signaal afgeeft wat gebruikt wordt als stuur-

afbuigspiegel. Vermeld zij dat de afbuigspiegel bij verdraaiing geen extra optische weglengte mag introduceren of deze moet op elke positie bekend zijn.

Optische elementen

Voor het meten van kleine verplaatsingen op microstructuren kan soms met vrucht gebruik worden gemaakt van optische elementen als lenzen. Voorbeelden van metingen die op de TUE zijn uitgevoerd zijn gegeven in de figuren 10 en 11.

Daarbij wordt gebruik gemaakt van het feit dat in het brandvlak van de lens L de laserbundel over een beperkte lengte een vlak golffront heeft waardoor kleine hoogtevariaties in de interferometer kunnen worden gemeten. In beide gevallen is een zorgvuldige kalibratie noodzakelijk. Meer van dit soort toepassingen zijn elders beschreven [8,9].

3. Nauwkeurigheid van laserinterferometers

Met formule (6) kan de relatieve onnauwkeurigheid van laserinterferometers worden benaderd:

$$\delta l/l = \delta(k+a)/(k+a) + \delta\lambda_v/\lambda_v - \delta N/N \quad (6)$$

De eerste term wordt bepaald door het telsysteem dat de intensiteitswisselingen vastlegt tijdens de verplaatsing l. Belangrijk is dat er geen telfouten optreden en dat de fractie a goed bepaald wordt, vooral als de verplaatsing klein is. Uit kalibraties is gebleken dat in veel gevallen dit gedeelte van de commercieel verkrijgbare laserinterferometers goed functioneert (paragraaf 4).

De relatieve onnauwkeurigheid in de vacuümgolflengte van de laser, de tweede term, wordt volledig bepaald door het gedrag van de laser en zijn kalibratie. Vanuit de laserfysica gezien kan een He-Ne laser maximaal een relatieve drift, $\delta\lambda_v/\lambda_v$, vertonen van $3 \cdot 10^{-6}$. Dit is groter dan de gewenste nauwkeurigheid en daarom voert men golflengtestabilisatie uit. Hiertoe regelt men de laserlengte zodanig dat de uitgezonden golflengte slechts weinig varieert rondom een gekozen instelpunt. Voor de meeste commercieel verkrijgbare laserinterferometers geldt dat ze voldoen aan: $10^{-8} < \delta\lambda_v/\lambda_v < 10^{-7}$.

Meestal is de reproduceerbaarheid van het instelpunt slechter zodat dit de bepalende factor wordt. Fysisch gezien drijft de gemiddelde vacuümgolflengte van de He-Ne laser gedurende de levensduur relatief ongeveer 10^{-7} , de golflengte wordt groter wat wordt veroorzaakt door veranderingen in de gassamenstelling. Een laatste niet onbelangrijke factor is het golflengteverschil tussen de door de fabrikant gehanteerde waarde en de werkelijk optredende waarde tijdens de metingen. Ter illustratie van voorkomende verschillen is een tabel met meetresultaten opgenomen zoals deze in ons laboratorium zijn vastgesteld. De laatste kolom geeft het effect bij lengtemetingen.

Uit het bovenstaande kan worden geconcludeerd dat golflengtestabilisatie noodzakelijk is en dat controle op repro-

Tabel 1
Golflengte-waarden van He-Ne lasers

Gemeten golflengte λ_m [µm]	Opgegeven golflengte λ_v [µm]	Relatieve afwijking $\delta l/l \cdot 10^7$
0,632991367	0,632991480	-1,7
0,632991329	0,632991400	-1,1
0,632991409	0,632991400	0,1
0,632991372	0,632991393	-0,3
0,632991352	0,632991393	-0,7
0,632991423	0,632991470	-0,8
0,632991252	0,632990336	14,5

Tabel 2
Invloed van stoffen op de brekingsindex van lucht

Stof	(N - 1) · 10 ⁶ (standaardcondities)	Concentratie (ppm) voor $\delta N/N = 10^{-7}$
lucht	272	-
koolmonoxide	312	2480
kooldioxide	417	686
zwaveldioxide	623	284
ammoniak	352	1240
propaan	1022	133
butaan	1286	99
octaan	2300	49
benzol	1577	77
ethanol	809	186
aceton	1016	134
methaan	410	721
pentaan	1660	72
chloroform	1340	94

duceerbaarheid van het instelpunt en de waarde van de vacuümgolflengte eveneens dient te worden uitgevoerd.

De laatste term, $\delta N/N$, wijst op de onnauwkeurigheid in de brekingsindex. Zoals al eerder is opgemerkt is deze invloed groot ten opzichte van de andere invloedsfactoren. De momentane golflengte in de interferometer wordt berekend uit de vacuümgolflengte van de laser en de brekingsindex volgens:

$$\lambda_l = \lambda_v \cdot N \quad (7)$$

Uitgangspunt is hier dat er in het meettraject geen gradiënten in de brekingsindex voorkomen. De brekingsindex in lucht kan worden berekend uit de heersende condities [4]:

$$N = 1 + (D \cdot 0,104126 \cdot 10^{-4} \cdot P) / (1 + 0,3671 \cdot 10^{-2} \cdot T) - 0,42066 \cdot 10^{-9} \cdot F \quad (8)$$

met daarin:

- D = $0,27651754 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 53,5 \cdot 10^{-8} \cdot (C - 300))$;
- P de luchtdruk in Pa;
- T de luchtdruk in °C;
- F de waterdampdruk in Pa;
- C het CO₂-gehalte in parts per million (ppm).

Zoals in paragraaf 2 reeds is aangegeven, beïnvloeden andere gassen in de lucht de brekingsindex. De invloed hiervan is te berekenen [4]. Voor een aantal relevante gassen en dampen is de invloed in tabel 2 samengevat.

Het is wel duidelijk uit deze gegevens dat de invloed van sommige stoffen groot is en men deze niet in de omgeving van een interferometer kan gebruiken. Dit speelt sterk bij precisiewerkingsmachines die laserinterferometers als meetsystemen gebruiken. Men dient hier dus extra te letten op het gebruik van smeer- en koelmiddelen, de invloed kan soms extreem groot zijn [2].

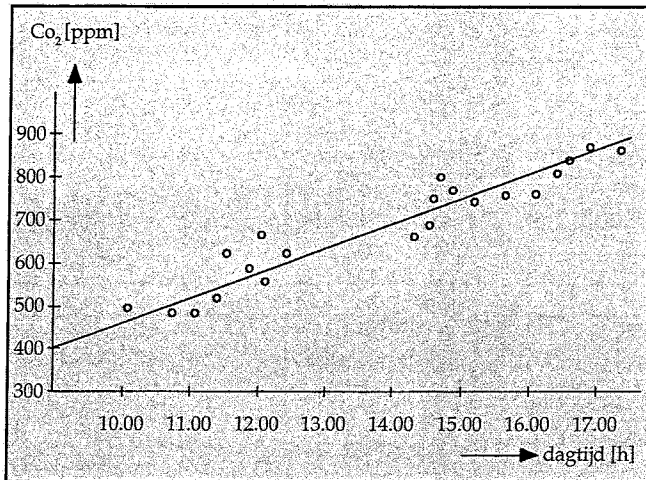
De invloed van afwijkingen bij de bepaling van de invloedsfactoren kan men berekenen uit (8). Grofweg komt het op het volgende neer:

$\delta P = 1$ mbar	geeft $\delta N/N \approx 3 \cdot 10^{-7}$
$\delta T = 1$ °C	geeft $\delta N/N \approx 10^{-6}$
$\delta F = 1$ mbar	geeft $\delta N/N \approx 4 \cdot 10^{-8}$
$\delta C = 100$ ppm	geeft $\delta N/N \approx 1,5 \cdot 10^{-8}$

Tabel 3

De laatste invloed lijkt niet zo groot maar het CO₂-gehalte wordt bij commerciële interferometers niet meegenomen zodat elke afwijking van de standaardconcentratie mee gaat doen. Ter illustratie geeft figuur 12 de meting weer van de verandering van het CO₂-gehalte in een meetruimte van 300 m³ op de TUE, gemiddeld bezet met 7 personen.

Het is duidelijk dat in dit soort situaties de invloed van het CO₂-gehalte ook meegenomen dient te worden bij nauwkeurige metingen.



Figuur 12 Veranderingen van het CO₂-gehalte in de meetruimte van de TUE

Bij kalibratiemetingen worden dikwijls temperatuursensoren toegepast om de temperatuur van het meetobject vast te stellen en daaruit een correctie voor uitzetting door te voeren. Een probleem daarbij is dat dikwijls de lineaire uitzettingscoëfficiënt van het te meten object slecht bekend is.

De onnauwkeurigheid die daaruit ontstaat laat zich berekenen uit:

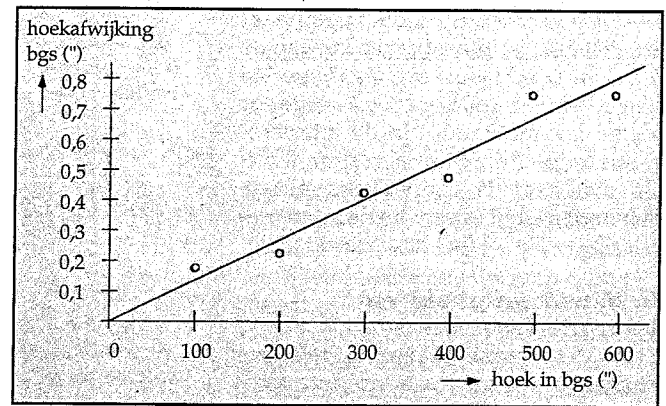
$$\delta l/l = (T - 20) \cdot \delta \alpha \quad (9)$$

hier is T de objecttemperatuur en $\delta \alpha$ de onnauwkeurigheid in de lineaire uitzettingscoëfficiënt.

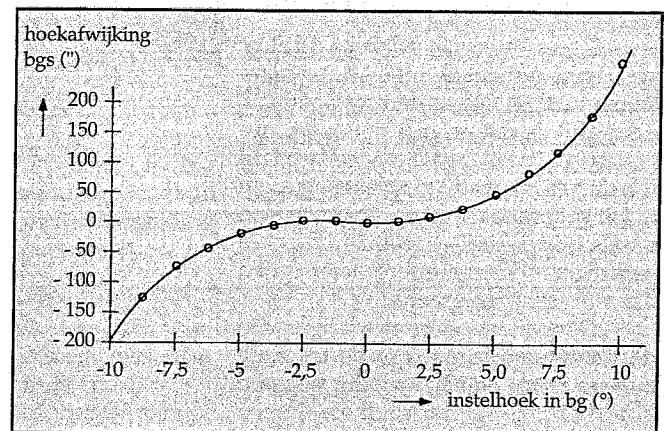
Bij hoekmetingen is de invloed van de brekingsindex van weinig belang als er uniforme condities zijn en de meetopstelling symmetrisch is. Ook dienen de meetbundels parallel te lopen zoals al in paragraaf 2 is aangegeven. Toch kunnen ook hier nog aanzienlijke afwijkingen optreden als de te meten hoeken groter worden dan enige boogminuten. In figuur 13 is een grafiek gegeven van geconstateerde afwijkingen in een meetgebied van 10' vanuit de nulstand, dus spiegelstand loodrecht op de meetbundels.

Elders zijn voor grotere meetbereiken ook aanzienlijk grotere afwijkingen vastgesteld [8]. In figuur 14 is het resultaat weergegeven.

Voor rechtheidsmetingen gelden dezelfde eisen ten aanzien van gradiënten in de brekingsindex als voor hoekmetingen, terwijl ook hier weer de symmetrie van de meetopstelling van groot belang is bij veranderende omstandigheden. Van belang is hier ook nog dat de fabrikant de openingshoek α tussen de meetbundels voldoende nauwkeurig heeft bepaald daar anders



Figuur 13 Kalibratie van de hoekmeetoptie van een laserinterferometer (meting TUE)



Figuur 14 Kalibratie hoekmeetoptie voor groot meetbereik

direct systematische afwijkingen in de meetresultaten optreden volgens:

$$\delta(\Delta h)/\Delta h = -\delta \alpha/\alpha \quad (10)$$

Ook dienen de reflectoren die bij deze metingen gebruikt worden zeer goed vlak te zijn daar de bundels bij de metingen over de vlakken verplaatst worden waardoor vlakheidsafwijkingen direct in de metingen tot uiting komen. Bij het gebruik van glaswigen (paragraaf 2) speelt de homogeniteit van het glas ook nog een belangrijke rol. Dit alles leidt er toe dat men bij precisie-rechtheidsmetingen zeer kritisch dient te zijn en controlemetingen -zoals meting na omslag- dient uit te voeren.

Tot slot zij opgemerkt dat bij metingen met de interferometerafwijkingen via de meetopstelling kunnen worden geïntroduceerd. Bekende voorbeelden zijn hier de "dode weg" en "cosinus" afwijkingen. Het is derhalve belangrijk de meetopstelling zeer zorgvuldig te analyseren.

4. Kalibratie van laserinterferometers

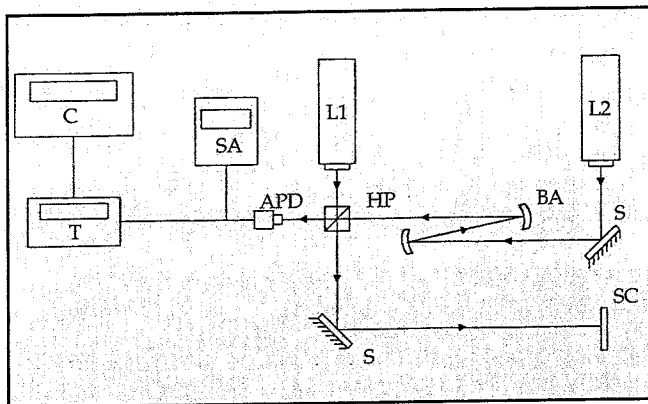
Uit de voorgaande beschrijving is af te leiden dat, ofschoon de laserinterferometer als meetinstrument voor ver-

plaatsingen, hoeken en rechtheid een zeer hoge nauwkeurigheid kan leveren, gezonde argwaan ten aanzien van de verkregen resultaten op zijn plaats is. Een redelijke zekerheid biedt een regelmatige kalibratie door NKO-erkende laboratoria (NKO: Nederlandse Kalibratie Organisatie te Delft). De kalibratie dient het gehele systeem te omvatten, te weten de laserlichtbron, het telsysteem en de sensoren voor de bepaling van de luchtcondities en de objecttemperatuur. Bij nieuwe systemen kan het zinvol zijn de optische elementen voor hoek- en rechtheidsmeting in de kalibratie te betrekken.

Kalibratie van de laserlichtbron

De kalibratie van de laserlichtbron verloopt via een frequentieverschilmeting tegen de praktische lengtestandaard, de helium-neon laser, golflengtegestabiliseerd met behulp van verzadigde absorptie in jodiumdamp [4]. De meting is in wezen vrij simpel: de straling van de te kalibreren laser wordt gemengd met de standaard waarna dit mengproduct wordt gemeten met een snelle fotodiode. De fotodiode levert een uitgangssignaal waarvan de frequentie gelijk is aan het frequentieverschil Df tussen de standaard en de te kalibreren lichtbron.

Figuur 15
Meetopstelling
voor
frequentiemeting
van lasers



De standaard bezit een aantal standaardfrequenties f_s , apart instelbaar, waarvan de frequentiewaarden in 1984 zijn vastgelegd door de "Conference Generale des Poids et Mesures" te Parijs.

Daar werd tevens de lichtsnelheid in vacuüm C vastgelegd op $299792458 \text{ ms}^{-1}$. De vacuümgolflengte wordt nu berekend uit:

$$\lambda_v = C / f_s \quad (11)$$

De frequentie van de gekalibreerde lichtbron wordt bepaald uit:

$$f_1 = f_s + \Delta f \quad (12)$$

en daaruit de vacuümgolflengte van deze lichtbron weer als (11).

De meetopstelling zoals die in het TUE-laboratorium is opgebouwd is schematisch weergegeven in figuur 15.

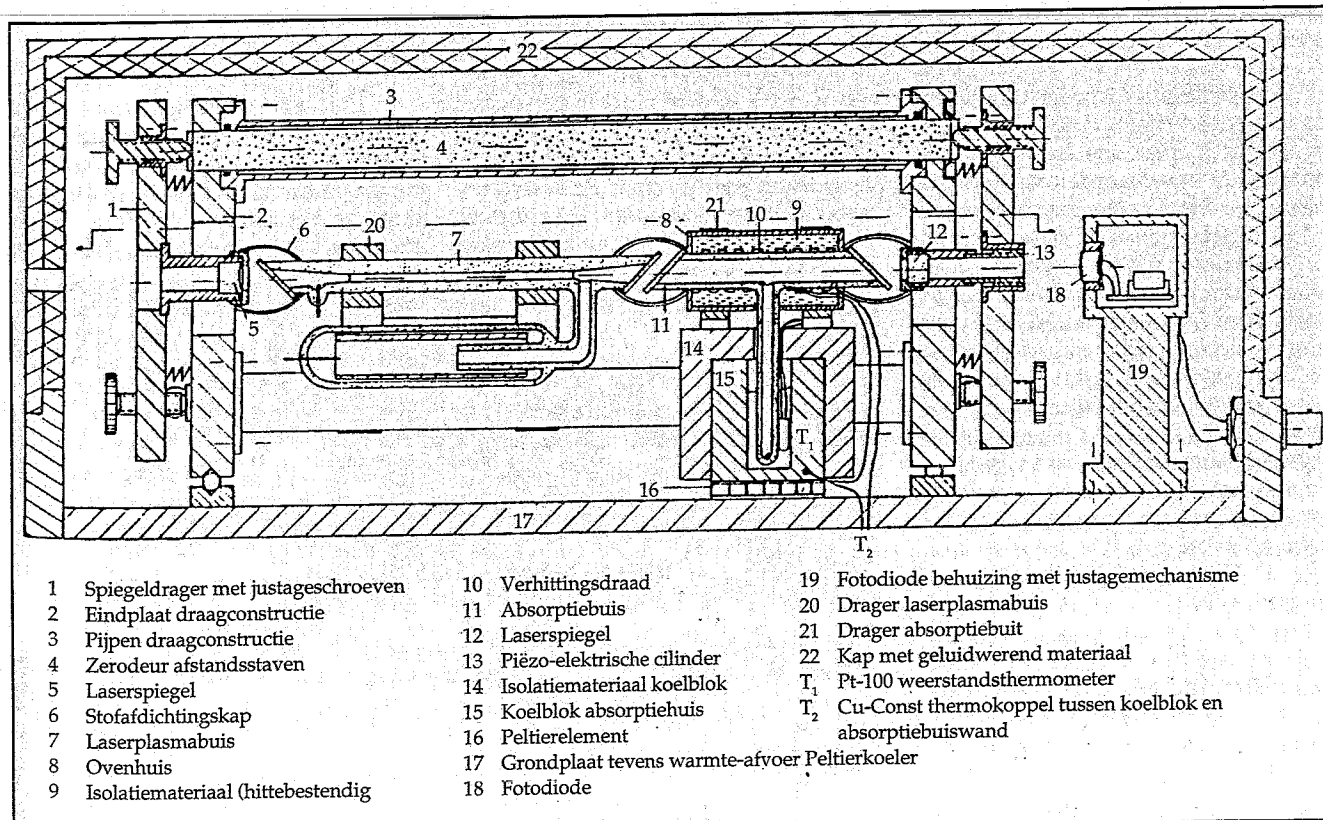
De straling van de te meten laser L2 wordt via de bundelaanpasser BA in het mengprisma HP gemengd met de straling van de standaardlaser L1. De resulterende straling wordt gedetecteerd op de fotodiode APD en het afgegeven signaal wordt naar de spectrumanalyser SA en de frequentieteller T geleid. Via het gekoppelde computersysteem wordt de verschilfrequentie verwerkt tot de frequentie en vacuümgolflengte van de te kalibreren laser. De berekende waarden zijn gemiddelden uit vele metingen die over verschillende dagen zijn herhaald. Ook kan het opwarmingsgedrag,

de reproduceerbaarheid en stabiliteit uit de metingen worden bepaald. Dit alles tegen de standaard gemeten die zelf een relatieve reproduceerbaarheid beter dan 10^{-10} , levert bij een relatieve stabiliteit, beter dan $5 \cdot 10^{-11}$.

De opbouw van de standaardlaser is een aardig stukje "precision engineering" dat uitvoerig elders is beschreven [4]. Figuur 16 geeft een doorsnede van deze standaard weer.

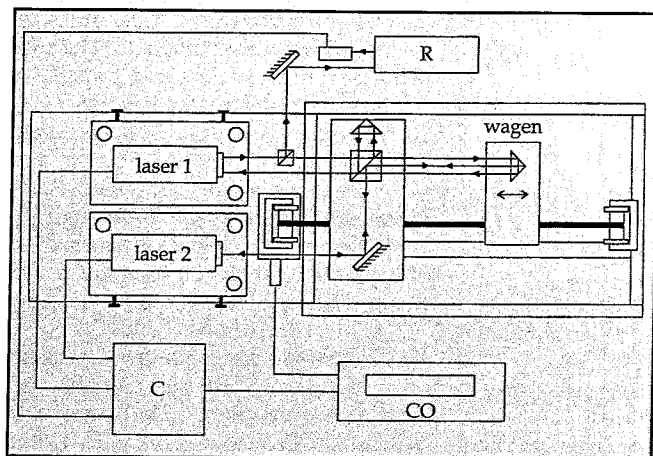
Kalibratie van het totale meetsysteem

Behalve de lichtbron dient ook het totale meetsysteem gekalibreerd te worden. Daartoe is op de TUE een meetopstelling ontwikkeld waarmee de benodigde kalibraties kunnen worden uitgevoerd. De basisstructuur is een rechtgeleiding van 3 m lengte waarlangs een wagentje kan worden verplaatst. Op het wagentje is voor een interferometer als reflector een triplespiegel gemonteerd waarin de meetbundels van een referentiesysteem en het te kalibreren meetsysteem worden geleid. De meetbundels zijn beide precies evenwijdig aan de bewegingsrichting van de wagen uitgelijnd en lopen op zeer korte afstand langs elkaar. De brekingsindex is daardoor voor beide systemen gelijk, temeer daar de meetopstelling is afgesloten door een polystyreen omkasting van 5 cm wanddikte. Hierdoor zijn gradiënten in



- | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1 Spiegeldrager met justageschroeven | 10 Verhittingsdraad | 19 Fotodiode behuizing met justagemechanisme |
| 2 Eindplaat draagconstructie | 11 Absorptiebuis | 20 Drager laserplasmabuis |
| 3 Pijpen draagconstructie | 12 Laserspiegel | 21 Drager absorptiebuit |
| 4 Zerodeur afstandsstaven | 13 Piëzo-elektrische cilinder | 22 Kap met geluidwerend materiaal |
| 5 Laserspiegel | 14 Isolatiemateriaal koelblok | T ₁ Pt-100 weerstandsthermometer |
| 6 Stofafdichtingskap | 15 Koelblok absorptiehuis | T ₂ Cu-Const thermokoppel tussen koelblok en absorptiebuiswand |
| 7 Laserplasmabuis | 16 Peltierelement | |
| 8 Ovenhuis | 17 Grondplaat tevens warmte-afvoer Peltierkoeler | |
| 9 Isolatiemateriaal (hittebestendig) | 18 Fotodiode | |

Figuur 16 Opbouw van de standaardlaser



Figuur 17 Kalibratieopstelling voor laserinterferometers

de brekingsindex verwaarloosbaar. De brekingsindex in de interferometer kan worden bepaald via een gekoppelde refractometer die in paragraaf 2 besproken is. De meetresultaten van de referentie-interferometer kunnen nu worden vergeleken met die van de te kalibreren interferometer die een eigen brekingsindexbepaling heeft in het gelijke meettraject. Ook kan men in beide interferometers dezelfde brekingsindex invoeren zodat gemeten verschillen nu veroorzaakt moeten worden door telfouten in de interferometer mits men gecorrigeerd heeft voor een mogelijk verschil in golflengte der beide lichtbronnen. Figuur 17 geeft het totale meetsysteem schematisch weer.

De kalibraties worden uitgevoerd door de meetwagen langs de rechtgeleiding te verplaatsen en op gekozen posities de meetwaarden van de referentie L1 en het te kalibreren lasersysteem L2 via de telsystemen C in de computer CO vast te leggen. Ook kan de meetwaarde van de refractometer R worden vastgelegd in de computer. Nadat het meettraject is doorlopen kan de nauwkeurigheid van het te kalibreren systeem worden bepaald. Ook hier worden reproduceerbaarheidsmetingen over meerdere dagen uitgevoerd terwijl ook de nulpuntsdrift wordt vastgesteld. De relatieve onnauwkeurigheid van deze kalibratiemetingen is bepaald op $2 \cdot 10^{-7}$.

De sensoren voor druk, temperatuur en vochtigheid van de te kalibreren laserinterferometer kunnen ook nog apart worden gecontroleerd. Voor de controle van de temperatuursensoren is een precisie-warmtewisselaar gebouwd waarin de temperatuur kan worden gevarieerd tussen 15 en 50 °C. In de meetruimte worden de te meten sensoren gemonteerd naast precisie weerstandsthermometers waarmee de tem-

peratuur ter plaatse wordt vastgesteld evenals de systematische afwijkingen van de te controleren temperatuursensoren. Daarnaast is een meetcel voor de controle van druksensoren gebouwd waarin de druk kan worden gevarieerd tussen 950 en 1050 mbar.

De heersende druk in de cel wordt bepaald met behulp van een precisiebarometer. De vochtigheidssensoren tenslotte worden gecontroleerd met behulp van een vochtigheidsmeter van het droge natte bol type.

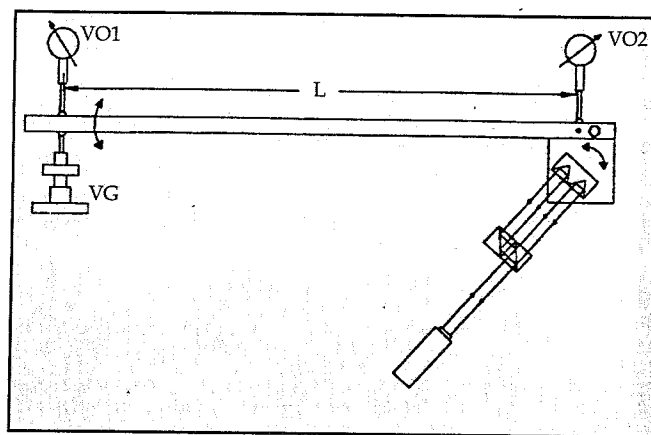
De kalibratie van de interferometer voor hoek- en rechtheidsmeting moet apart worden uitgevoerd. Voor de kalibratie van de hoekmeting kan gebruik worden gemaakt van een precisiehoekgever. Hierop worden de reflectoren van de interferometer geplaatst. Vervolgens worden deze voor een aantal ingestelde hoeken in het meetbereik vergeleken met de door de interferometer uitgegeven waarden. Voor dit doel is op de TUE een precisie-hoekgever

ontwikkeld die werkt volgens het principe van de sinusliniaal. In figuur 18 is het principe van deze meetopstelling geschetst.

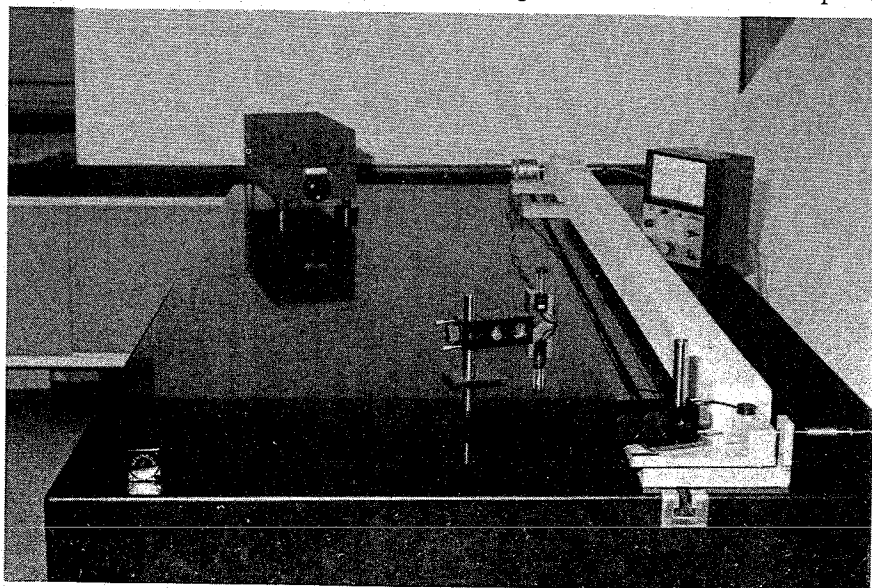
Het meetprincipe is eenvoudig: twee verplaatsingsopnemers VO1 en VO2 zijn op een afstand L voor een draaibare balk gemonteerd met draaipunt in O. Op het meetplateau zijn de reflectoren voor hoekmeting geplaatst en daarvoor de laserinterferometer voor hoekmeting. Met de verplaatsingsgever VG kan nu via een verplaatsing een hoek α worden ingesteld die kan worden berekend uit:

$$\sin \alpha = (VO1 - VO2)/L \quad (13)$$

VO1 en VO2 zijn hier de meetwaarden van de verplaatsingsopnemers waarbij de waardeverandering van VO2 minimaal is maar tevens dient ter bewaking van het meetproces. De onnauwkeurigheid van deze kalibratie is bepaald



Figuur 18 Kalibratie van een laserinterferometer voor hoekmetingen (schema)



Figuur 19 Kalibratie van een laserinterferometer voor hoekmetingen

op 0,2". De meetresultaten die in figuur 13 zijn weergegeven zijn met deze meetopstelling verkregen. Voor het meten van grote hoeken met de laserinterferometer zijn de systematische afwijkingen veel groter en moeten voor nauwkeurige metingen grote correcties worden doorgevoerd (figuur 14).

Figuur 19 laat de praktische uitvoering zien van een kalibratie van een laserinterferometer voor hoekmeting.

Bij de kalibratie van de interferometer voor rechtheidsmeting dient de verplaatsing van het metend element, het Wollastonprisma of de optische wig, gemeten te worden met een precisieverplaatsingsmeter en deze meetwaarde dient te worden vergeleken met de door de interferometer uitgegeven waarde. Een probleem hierbij is dat tijdens een rechtheidsmeting het metend element ook in de bundelrichting wordt verplaatst. Hierdoor worden andere delen van de reflector gebruikt die vlakheidsafwijkingen kunnen vertonen die zich als rechtheidsafwijkingen manifesteren. Herhaling van de metingen in een positie waarbij de reflector 180° om de meetas is gedraaid, kan hier uitkomst bieden. Een meetopstelling voor deze kalibratie is op de TUE in ontwikkeling.

5. Conclusies

Mede door het toenemend gebruik in zeer verschillende gebieden is de laserinterferometer de laatste jaren uitgegroeid tot het belangrijkste kalibratie-instrument in de geometrische meettechniek. Met name omdat de conventionele middelen niet voldeden zijn er inmiddels zeer veel toepassingen ontwikkeld. Het aantal meetmogelijkheden in de geometrische meettechniek is dan ook aanzienlijk toegenomen. Uit bovenstaande is duidelijk dat daar waar een hoge nauwkeurigheid is gewenst, de toepassing veel zorg vereist. Vooral de luchtcondities dienen met zorg te worden bepaald. Het inzetten van niet-gekalibreerde apparatuur is riskant.

Literatuur

- [1] Laserinterferometer in der Industriellen Meßtechnik H. Meiser, W. Luhs, G. Litfin, Feinwerk und Meßtechnik, 96, 10, 1988.
- [2] Modificatie en automatisering van een kalibratieopstelling van laserinterferometers. R. Muijt, afstudeerverslag TUE, WPA 0557, 1988.
- [3] Toepassing van interferometrische technieken in de produktietechniek. P. Schellekens, MB Produktietechniek, 21, 1984.
- [4] Absolute meetnauwkeurigheid van technische laserinterferometers. P. Schellekens, dissertatie Technische Universiteit Eindhoven, 1986.
- [5] A new laser measurement system for precision metrology. G. Som-margren, Precision Engineering, no.4, 1987.
- [6] Ontwikkeling van een data-aquisitiepakket ten behoeve van de kalibratie van 3D-meetmachines. H. Spaan, onderzoeksopdracht TUE, WPA 0737, 1989.
- [7] Afnameprocedures voor coördinatenmeetmachines. F. Theuws, P. Schellekens, MB Produktietechniek, no.3, 1990.
- [8] DI Berichte 548/GMR Bericht 6. Seminar Laserinterferometrie in der Langenmeßtechnik, VDI Verlag, Dusseldorf, 1985.
- [9] VDI Berichte 749/750; Seminar Laserinterferometrie; VDI Verlag Dusseldorf, 1989.
- [10] Laserinterferometer system for metrology and machine tool applications. L. Wuerz, R. Quenelle, Precision Engineering, no.3, 1983.

Gereedschappen en produktietechnieken 1
P.Q.M. Sprinkhuizen en P. Boelens
1989 BV Uitgeverij Nijgh & Van Ditmar,
's-Gravenhage
ISBN 90-236-0403-2
316 blz., 170 x 240 mm

Voor mij ligt het eerste deel van de nieuwe serie boeken Gereedschappen en produktietechnieken. Deze serie is bedoeld voor de afdeling werktuigbouwkunde voor het MTO en andere opleidingen op gelijkwaardig niveau. De boeken zijn gebaseerd op het nieuwe VMST-leerplan, op ervaringen met lesmateriaal van oudere datum en nieuwe ontwikkelingen in het onderwijs. Uiteraard zijn ontwikkelingen van de techniek eveneens verwerkt.

De hele serie zal uiteindelijk bestaan uit de volgende delen:

- 1 : de machines staan centraal;
- 2a: de mogelijkheden van verspanende machines;
- 2b: de mogelijkheden van niet-verspanende machines;
- 3a: verspaningstechniek;
- 3b: niet-verspanende technieken.

Bovendien is er een apart boek CNC-techniek door J. Hollebrandse.

De onderwerpen die in deel 1 aan de orde komen zijn met titels van de hoofdstukken: 1 gereedschapstechnologie, 2 grondbeginselen van het meten, 3 verspanende handgereedschappen, 4 boren, 5 machinaal zagen, 6 draaien, 7 frezen, 8 buigen, 9 delen, knippen en ponsen, 10 verbinden, klinken en felsen, 11 autogeen lassen, 12 lassen met beklede elektroden, 13 solderen, 14 werkvoorbereiding.

Aan machines en gereedschappen wordt ongeveer evenveel aandacht gegeven. Het boek is rijk geïllustreerd met zeer goede lijntekeningen en foto's. Bovendien is er een aantal tabellen, bijvoorbeeld met richtlijnen voor de keuze van verspaningscondities. Er zijn zeer veel opgaven opgenomen. Zoals men ziet komen zowel verspanende als niet-verspanende gereedschappen en machines aan bod. De auteurs hebben dit voor dit inleidende boek met opzet gedaan, zodat de studenten een duidelijk inzicht in de onderlinge relatie verkrijgen. Het boek is voor een dergelijk basisboek behoorlijk 'bij de tijd'. Het is een aanwinst voor het middelbaar technisch onderwijs.

Ir. C. A. van Luttervelt