

Rondheidsmeting met nanometer-nauwkeurigheid

H. Haitjema

Een van de belangrijkste soorten van vormmeting is het meten van rondheid. Ten behoeve van een rondheidsmeting welke herleidbaar is tot afwijkingen ten opzichte van een mathematische cirkel zijn rondheidsstandaarden ontwikkeld. De nauwkeurigste rondheidsstandaarden bestaan uit glazen halve bollen, keramische bollen of stalen kogels. Deze standaarden dienen om de rondloopnauwkeurigheid van rondheidsmeters te bepalen. Moderne rondheidsmeters hebben een rondloopnauwkeurigheid van circa $0,05 \mu\text{m}$. De meeste in omloop zijnde rondheidsstandaarden hebben een rondheidsafwijking van $0,05 \mu\text{m}$ of kleiner. Voor een zinvolle kalibratie van deze standaarden is dus een methode vereist met een onzekerheid van $0,02 \mu\text{m}$ of minder. Een dergelijke nauwkeurigheid is ook noodzakelijk voor de meting van hoge-precisielokogels en cilinders. Dit artikel geeft weer hoe dit bij het NMI Van Swinden Laboratorium (VSL) is bereikt

Rondheidsmeter

De rondheidsmeter waarmee de kalibraties worden uitgevoerd is een Rank Taylor Hobson type Talyrond 200 rondheidsmeter. Het instrument is van het type waarbij het werkstuk roteert ('rotating workpiece') en de taster stilstaat. Het instrument is uitgerust met een inductieve taster met een effectieve armlengte van 60 mm. Het tastelement is een saffieren kogel met een diameter van 2 mm. De meetkracht is circa $0,05 \text{ N}$. De radiale spilafwijking (de rondlooppnauwkeurigheid) is ongeveer $0,05 \mu\text{m}$; de axiale spilafwijking (het op-en-neer gaan van de tafel tijdens het roteren) is circa $0,02 \mu\text{m}$.

Verwerking

Het tastersignaal wordt verwerkt door een commercieel verkrijgbaar data-ac-

quisitiesysteem genaamd 'Circom'

Hiermee worden per rotatie 1024 meetpunten ingelazen. Met de bijbehorende software kunnen rondheidsdiagrammen worden weergegeven volgens diverse referentiecirkels: minimum zone, kleinste kwadraten, grootste ingeschreven cirkel en de kleinste omgeschreven cirkel. De maximale vergroting bedraagt 20.000 maal. Ook wordt het signaal gefilterd met een gesimuleerd dubbel RC-filter met een afsnijfrequentie van naar keuze 500, 150, 50 of 15 golvingen per omwenteling (gpo).

Eigen software

Naast het 'Circom' pakket is er eigen software geschreven die de metingen verder kan verwerken. De mogelijkheden zijn

- centreren van een meting volgens het kleinste-kwadraten middelpunt; Hierbij wordt gecorrigeerd voor de vervorming van het profiel door het profiel aan te passen aan een limaçon volgens de methode beschreven in [1].
- meetpuntsgewijs middelen van een aantal gecentreerde profielen met berekenen van de standaardafwijking per meetpunt;
- roteren van een profiel over een bepaalde hoek,
- het verschilprofiel berekenen tussen twee profielen;
- vermenigvuldigen van een profiel met een bepaalde factor;
- harmonische analyse (Fourier-analyse) van een profiel. Het belang van harmonische analyse van rondheidsmetingen is in dit blad eerder behandeld door J.W. van Beek [2].
- digitaal filteren van een profiel volgens een dubbel RC-filter of een Gaussische filterkarakteristiek met elke willekeurige bandbreedte;
- berekenen van de onrondheid (variatie in straal) en ook van de variatie in diameter.

De aldus bewerkte metingen kunnen weer worden ingelazen in het Circom programma en daarnaast in het grafische pakket 'AXUM', waarmee onder

andere een rondheidsdiagram met een willekeurige vergroting kan worden gemaakt. De rondheidsdiagrammen in dit artikel zijn met dit pakket vervaardigd.

Bronnen van onzekerheid

De onzekerheid van een rondheidsmeting wordt in hoofdzaak bepaald door drie factoren:

- de kalibratie van de taster;
- de 'ruis' afkomstig van de taster, mechanische trillingen of van de rondheidsmeter;
- de rondloopnauwkeurigheid van de rondheidsmeter.

We gaan eerst in op de bepaling van de rondloopnauwkeurigheid van de rondheidsmeter en de reductie van de invloed hiervan. Hiervoor zijn twee methoden in gebruik die hieronder kort worden behandeld. Deze methoden zijn ook beschreven in ISO 4291 [3].

Stappenmethode

De stappenmethode reduceert zowel radiale als axiale spilafwijkingen. Deze methode bestaat eruit dat de te meten standaard wordt gemeten in een bepaalde oriëntatie, waarna de meting wordt herhaald met de standaard over een bepaalde hoek (een geheel deel van 360°). De standaard wordt gedraaid tot in een aantal stappen 360° is doorlopen. In elke stand is de meting een andere combinatie van afwijkingen van zowel de spil als de standaard.

De spilafwijking wordt nu gevonden uit het middelen van alle profielen. Het profiel van de standaard wordt gevonden door eerst de profielen te roteren zodanig dat de oriëntatie van de standaard dezelfde is en daarna de profielen te middelen. Deze methode elimineert grotendeels de spilafwijking met de beperking dat alle harmonische componenten van een veelvoud van het aantal genomen stappen niet worden geëlimineerd. Bijvoorbeeld: bij twee stappen van 180° worden alle oneven harmonischen geëlimineerd, dus de 3-, 5-, 7-, 9-

Rondheidsmeting met nanometer-nauwkeurigheid

punts, enzovoorts, onrondheid van de spilafwijking. Bij twaalf stappen blijven over de 12-punts onrondheid alsmede de 24-punts, 36-punts etc. In het algemeen bevatten zowel de spilafwijking als rondheidsstandaarden voornamelijk lage harmonischen (< 10), zodat deze beperking bij een voldoende aantal stappen in de praktijk geen merkbare afwijkingen geeft. Deze procedure is vooral geschikt voor een rondheidsmeter met een roterende taster, omdat dan bij het roteren van de standaard de rondheidsspil kan blijven draaien. Toepassing van deze methode wordt onder andere beschreven in [4] en [5].

Omslagmethode

De omslagmethode elimineert alleen radiale spilafwijkingen. Hierbij wordt een rondheidsstandaard wordt gemeten (situatie A), waarna nog een meting wordt gedaan na draaiing van de standaard over 180°, terwijl ook de taster 180° verdraaid is vanuit zijn normale positie ten opzichte van de spil (situatie B). Een en ander is geïllustreerd in figuur 1.

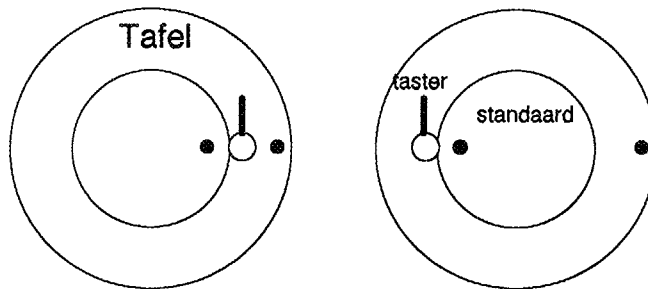
De spilafwijking heeft in situatie B een tegengestelde invloed op het profiel vergeleken met situatie A. Daarom kan het profiel van de standaard worden gevonden door het gemiddelde te nemen van profiel A en B. De spilafwijking is de helft van het verschil tussen profiel A en B.

Als voorbeeld zijn in figuur 2 en 3 meting A en B weergegeven van een rondheidsstandaard met een ongeveer even grote rondheidsafwijking als de spil.

In figuur 4 en 5 zijn de hieruit afgeleide rondheidsafwijking van de standaard en de spilafwijking weergegeven. De onregelmatigheid bij -20° is een effect van de elektronica.

Merk op dat de vergroting circa 350.000 maal bedraagt in plaats van de 20.000 maal die bij conventionele rondheidsmeters het maximum is

Deze procedure elimineert de radiale spilafwijking volledig. Nadeel is dat axiale afwijkingen niet worden geëlimineerd. Bij het VSL is deze afwijking maximaal 0,02 µm. Dit effect beïnvloedt het meetresultaat alleen als de meetrichting niet loodrecht op de rotatie-as staat, zoals bij glazen halve bollen.



Figuur 1 Configuratie van standaard en taster bij de omslagmethode

Methode gebruikt bij NMI-VSL

De standaardprocedure bij het VSL bestaat uit een combinatie van de omslagmethode en de stappenmethode. De omslagmethode wordt twee maal toegepast waarbij de standaard 180° wordt verdraaid. De oriëntaties van taster en standaard ten opzichte van de rondheidstafel (spil) zijn weergegeven in figuur 6.

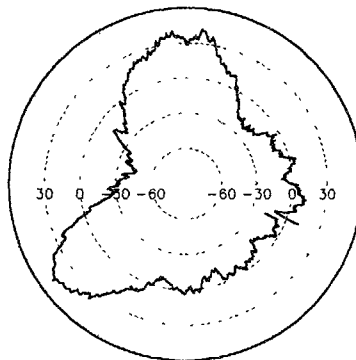
De volgorde van meten is:

- meting van standaard in normale positie (situatie A in figuur 6);
- meting met taster 180° gedraaid (situatie B in figuur 6);
- meting met taster en standaard 180° gedraaid (situatie C in figuur 6);

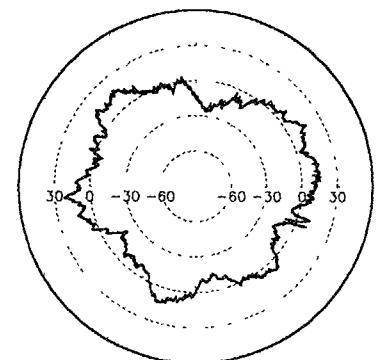
- meting met taster in normale positie, standaard 180° gedraaid (situatie D in figuur 6).

Voor deze volgorde is gekozen omdat tussen meting A en B en tussen meting C en D de rondheidsstandaard gecentreerd in dezelfde positie kan blijven staan en de rondheidstafel kan blijven draaien.

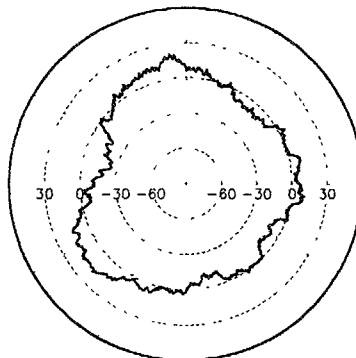
In elke combinatie van de positie van tasterstandaard worden tien metingen uitgevoerd die worden gecentreerd en gemiddeld. Daarna wordt van deze gemiddelden het gemiddelde genomen van enerzijds de metingen in positie A en C en anderzijds van de metingen in de positie B en D. Het rondheidsdia-



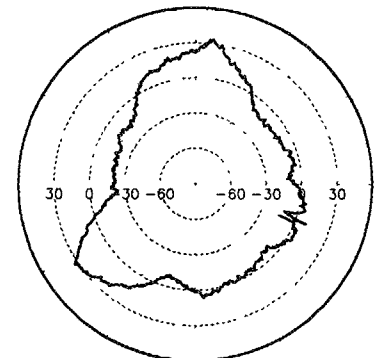
Figuur 2 Meting (nm) in configuratie A



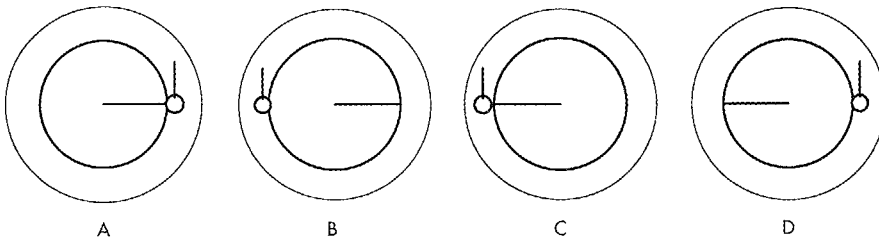
Figuur 3 Meting (nm) in configuratie B



Figuur 4 Uit A en B afgeleid rondheidsdiagram van de standaard (A+B)/2 (nm)



Figuur 5 Uit A en B afgeleid diagram van de spilafwijking (A-B)/2 (nm)



Figuur 6 Configuratie van taster en standaard bij NMI-methode

gram van het gemiddelde van metingen B en D wordt 180° gedraaid en gemiddeld met het gemiddelde van de metingen A en C.

Schematisch samengevat geldt dus voor het rondheidsdiagram van standaard S: $S = 0,25 (A + C + B^R + D^R)$.

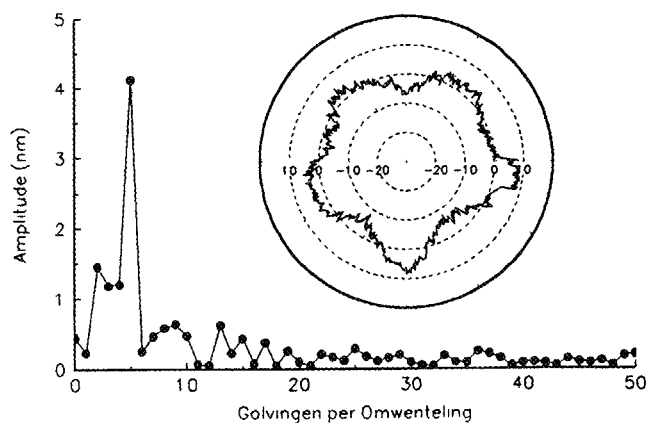
Hierbij staat R voor het 180° geroteerde diagram. Het resultaat S is een rondheidsdiagram van 1024 meetpunten dat de rondheidsafwijkingen van de standaard weergeeft. Elk van deze 1024 meetpunten is een gemiddelde van veertig metingen.

Kalibratie van de taster

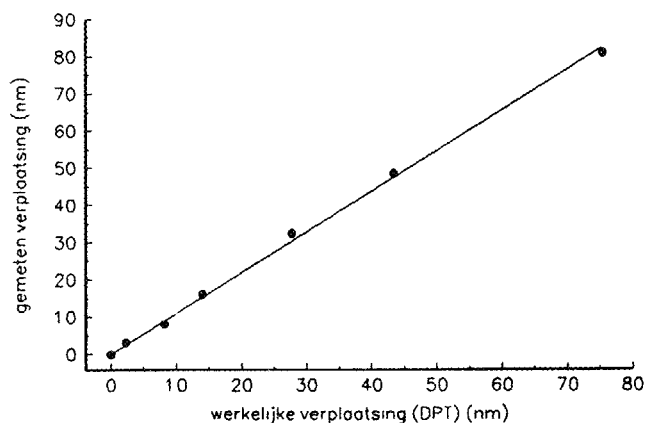
Bij het meten van rondheidsstandaarden maakt, na goed centreren, de taster heen- en weergaande bewegingen met een maximale uitwijking van circa 80 nm (0,08 μm). Daarbij introduceren zowel de elektronica als de spil een 'ruis' die kan worden gekarakteriseerd met een standaardafwijking van circa 8 nm. De kalibratie van de taster moet zodanig gebeuren dat deze ruis wordt uitgemiddeld op dezelfde wijze als dit tijdens een meting gebeurt.

Hiervoor wordt de volgende methode gebruikt.

De kalibratie wordt uitgevoerd met een digitale piezoverplaatser (DPT) die een verplaatsing kan genereren tot 15 μm . Binnen dit bereik is de DPT gekalibreerd over 6 μm met een onzekerheid van 2 nm. De taster wordt van de rondheidsmeter genomen en in een opstelling geplaatst waarmee door de DPT een verplaatsing aan de taster wordt opgelegd. De DPT wordt door een functiegenerator aangestuurd, zodanig dat door de rondheidsmeter vijf sinusgolven per omwenteling worden gemeten. Het signaal wordt over tien metingen gemiddeld, waarna fourieranalyse wordt toegepast. De amplitude van de 5^e fouriercomponent wordt nu vergeleken met de door de DPT geleverde amplitude van de verplaatsing. Ter illustratie is in figuur 7 het gemeten rondheidsdiagram weergegeven. Het signaal, dat zich laat weergeven als een 5-punts onrondheid, is nauwelijks van de ruis te onderscheiden. In het fourierspectrum is de 5^e component echter duidelijk te onderscheiden van de andere componenten die als ruis zijn te beschouwen. De herhaalbaarheid (standaardafwijking) in deze meting bedroeg 0,2 nm voor het gemiddelde van tien metingen.



Figuur 7 Rondheidsdiagram met amplitudespectrum. De aangeboden sinus heeft een amplitude van 4,2 nm



Figuur 8 Resultaat van de tasterkalibratie met behulp van een digitale piezoverplaatser (DPT)

Het resultaat van de kalibratie tot 80 nm is weergegeven in figuur 8. In deze figuur is te zien dat de lineariteitsafwijking binnen de 2 nm blijft indien rekening wordt gehouden met een kalibratiefactor van 1,09. Gecombineerd met de onzekerheid van 2 nm in de DPT leidt dit tot een maximum afwijking van 3 nm bij gebruik van de taster en na vermenigvuldiging van de rondheidsafwijkingen met 1,09.

De rondheidsmeter kan volgens de specificaties rondheid meten tot een frequentie van 500 golven per omwenteling (gpo). Vaak ook worden filters toegepast om hogere frequenties te onderdrukken. Door verschillende frequenties aan de DPT op te leggen kunnen deze filters worden gecontroleerd en kan ook worden nagegaan tot welke frequentie het systeem taster-uitlezings-digitale verwerking, een rondheidsafwijking kan volgen. De DPT zelf heeft een afsnijfrequentie van 300 Hz, hetgeen overeenkomt met 3000 gpo. Dat zal op deze meting dus geen effect hebben.

De controle is uitgevoerd op het filter (in de standaardsoftware) ingesteld op afsnijfrequenties van 50 en 500 gpo. Met de DPT is een sinusgolf met steeds dezelfde amplitude gegenereerd met toenemende frequentie. De karakteristiek wordt vergeleken met de theoretische karakteristiek van een overeenkomstig dubbel RC-filter. Het resultaat is weergegeven in figuur 9.

De figuur laat zien dat de taster in combinatie met de elektronica hogere frequenties niet kan volgen. Als gevolg hiervan bedraagt de effectieve afsnijf-

Rondheidsmeting met nanometer-nauwkeurigheid

frequentie in plaats van de nominale 500 gpo circa 70 gpo en in plaats van de nominale 50 gpo bedraagt deze circa 40 gpo. Dit hoeft geen probleem te zijn zolang objecten worden gemeten met een lage frequentie-inhoud, zoals instellingen en rondheidsstandaarden. Bij ruwe oppervlakken kunnen echter grote afwijkingen optreden. Dit resultaat illustreert tevens de noodzaak van een dynamische kalibratie van tasters van rondheidsmeters en van andere vormmeetinstrumenten.

Voorbeeld van een meetresultaat

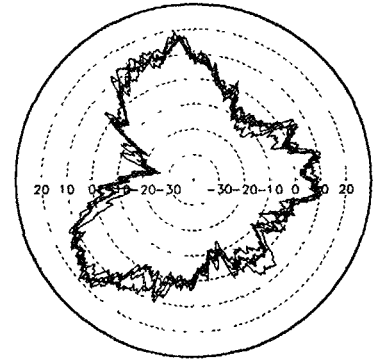
Als voorbeeld geven we de meetresultaten van metingen aan een keramische kogel, die bij het VSL is gemeten in het kader van een internationale ringvergelijking. Deze ringvergelijking is het vervolg op een eerdere ringvergelijking waarbij tussen standaardlaboratoria verschillen tot 25 nm waren gevonden [6]. Om te komen tot een zo verantwoord mogelijke benadering van de onzekerheid, is de meting uitgevoerd in vier posities van de standaard op de rondheidstafel: de twee posities zoals geschetst in figuur 6 (A,B en C,D) en twee posities met de standaard ten opzichte hiervan 90° gedraaid. Deze procedure leidt tot vier metingen volgens de omslagmethode, waarbij in elke meting de spilafwijking en de rondheidsafwijking van de standaard op een andere manier waren samengesteld. Afgezien van de taster zijn deze metingen dus onafhankelijk. De metingen zijn weergegeven in figuur 10 bij een vergroting van circa 500.000 maal.

De standaardafwijking in de enkele meetpunten bedroeg 8 nm. Aangezien elke meting volgens de omslagmethode het gemiddelde is van 2×10 metingen is de verwachte standaardafwijking in een meting volgens de omslagmethode $8/\sqrt{20} = 1,8$ nm. Bij het middelen van de vier rondheidsdiagrammen is de standaardafwijking echter 3,1 nm. Deze grotere waarde dan verwacht zal het gevolg zijn van het niet precies reproduceren van de spilafwijking nadat de rotatietafel tussen twee metingen wordt stilgezet en/of van hysteresis van de taster.

Een indruk van de onzekerheid in de componenten van de harmonische analyse wordt verkregen door deze van de vier metingen te vergelijken. Dit is gedaan in figuur 11. Uit de figuur blijkt dat de verschillende metingen tot vrijwel hetzelfde spectrum leiden; de spreiding ligt in de orde van 1 nm voor de lagere harmonische componenten ($n < 10$) en beneden circa 0,5 nm voor de hogere ($n > 20$). De figuur geeft tevens aan dat de harmonische componenten boven circa 25 gpo een geringe amplitude hebben ($< 0,5$ nm). Dit geeft aan dat de filtering door het systeem zelf boven circa 70 gpo het resultaat niet zal beïnvloeden.

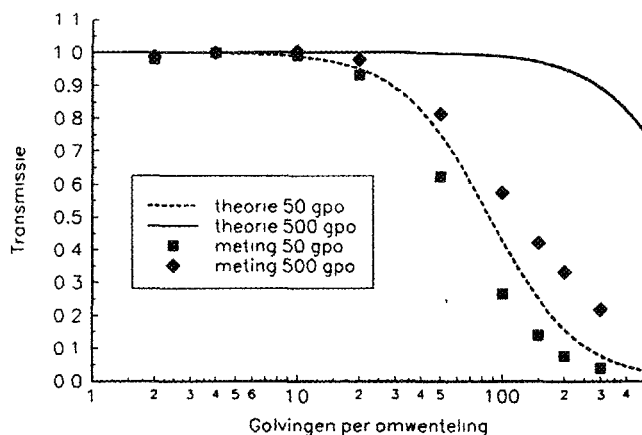
Onzekerheidsanalyse

Bovenstaande gegevens bevatten alle benodigde elementen voor een onzekerheidsanalyse conform de ISO 'Guide to the expression of uncertainties'. De hierin beschreven werkwijze komt erop neer dat de invloed van elke onzeker-

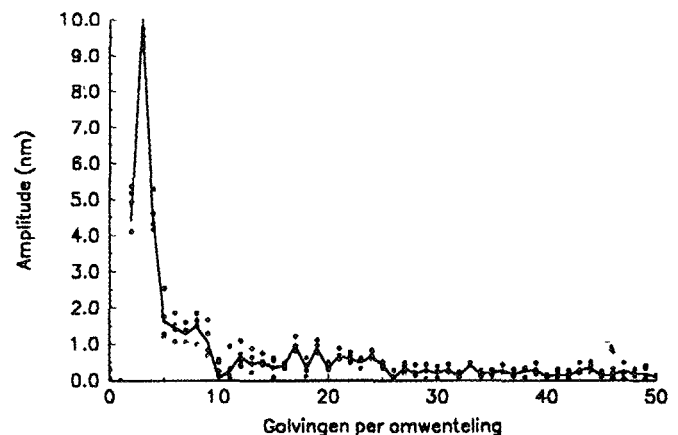


Figuur 10 Rondheidsdiagrammen van vier onafhankelijke metingen

heidsbron wordt herleid tot een 'standaard onzekerheid'. Als uit het experiment op statistische gronden een standaardafwijking kan worden bepaald is deze standaardafwijking de 'standaard onzekerheid'. Men noemt dit dan een 'type A evaluatie'. Bij de hier besproken metingen kan deze evaluatie worden toegepast op de 'ruis' van de taster en van de spilbeweging. Wanneer een onzekerheidsbron niet kan worden bepaald door statistiek op de metingen uit te voeren spreekt men van een 'type B evaluatie'. Bij de hier besproken metingen moet deze evaluatie worden toegepast op de kalibratie van de taster en op een eventuele invloed van de axiale spilbeweging. Deze evaluatie betekent dat uit bekende gegevens (de kalibratiecurve van de taster, de axiale spilafwijking) een karakteristieke standaardafwijking wordt afgeleid die de standaard onzekerheid voor de betreffende onzekerheidsbron vormt. De standaardonzekerheid behorend bij



Figuur 9 Frequentiecarakteristiek van de taster



Figuur 11 Amplitudespectrum van vier onafhankelijke metingen

elke onzekerheidscomponent, indien de meetmethode zoals geschetst in figuur 6 wordt gebruikt, wordt als volgt betoond:

- 'ruis' in de taster (type A);
De standaardafwijking in elk meetpunt bedraagt 8 nm per meting. Wanneer een gemiddelde uit 40 metingen wordt genomen wordt dit $8/\sqrt{40} = 1,3$ nm.
- niet-reproducerende spilbeweging na stilzetten (type A);
Hiervoor vonden we een waarde van 3,2 nm per meting volgens de omslagmethode (figuur 1). De procedure volgens figuur 6 leidt tot twee van deze bepalingen, hetgeen de standaardonzekerheid reduceert tot $3,2/\sqrt{2} = 2,3$ nm.
- kalibratie van de taster (type B);
In het voorgaande werd geconcludeerd dat de maximum afwijking van de taster 3 nm (top-top) bedraagt. Wanneer we dit opvatten als een onzekerheid op basis van een dubbele standaardafwijking, volgt hieruit een standaardonzekerheid van 1,5 nm.
- axiale spilbeweging (type B);
Bij metingen aan glazen halve bollen moet nog rekening worden gehouden met een component van de axiale spilbeweging. Aangezien de standaard onder een hoek van 30° wordt aangetast zal de axiale spilafwijking van $0,02 \mu\text{m}$ nog een invloed hebben van $0,01 \mu\text{m}$ ($0,03 \mu\text{m} \cdot \sin(30^\circ)$). Deze wordt verder gereduceerd met een factor 2, dus maximaal 5 nm. Als we deze 5 nm opvatten als het maximum van een onzekerheidsverdeling met een rechthoekige vorm, wordt de standaardonzekerheid $5/\sqrt{3} = 2,9$ nm.

Bovenstaande beschouwing kan worden samengevat in het volgende onzekerheidsbudget voor de kalibratie van een glazen halve bol in de posities van figuur 6:

Het resultaat is een standaardonzekerheid van 4 nm in elk van de 1024 punten van een rondheidsdiagram. De onzekerheid gebaseerd op de dubbele standaardafwijking (2σ) wordt daarmee 8 nm. De onzekerheid in de totale rondheidsafwijking, de top-top waarde, gebaseerd op 2σ , wordt dan $8\sqrt{2} = 12$ nm. Bij de meting van een kogel (geen in-

Onzekerheidsbron	Standaard-onzekerheid (1σ)	Invloed op eindresultaat (1σ)
kalibratie taster	1,5 nm	1,5 nm
herhaalbaarheid meting	8 nm	$8/\sqrt{40} = 1,3$ nm
reproduceerbaarheid spilbeweging	2,5 nm	$2,5/\sqrt{2} = 1,8$ nm
axiale spilbeweging	12 nm	2,9 nm
totaal (kwadratische som)		4,1 nm

vloed van axiale spilbeweging) wordt dit 8 nm; met de kogel ook 90° en 270° gedraaid wordt het 6 nm.

De onzekerheid in de componenten van de harmonische analyse is moeilijk te bepalen. Hoewel de herhaalbaarheid, met name bij hogere harmonische componenten, binnen enkele tienden van een nanometer ligt, is de herleidbaarheid (via de tasterkalibratie) beperkt tot 3 nm. Een uitgebreide analyse zou per harmonische component moeten plaatsvinden en valt buiten het kader van dit artikel.

Ringvergelijkingen

Begin 1994 is deelgenomen aan een ringvergelijking van rondheidsstandaarden. Hierbij zijn gemeten: een glazen halve bol met een rondheidsafwijking van circa 20 nm; een keramische kogel met een rondheidsafwijking van circa 45 nm (van deze kogel zijn de voorbeelden in dit artikel afkomstig) en een keramische kogel met een rondheidsafwijking van circa 900 nm. Omdat de ringvergelijking nog niet officieel is beëindigd zijn alleen informeel resultaten bekend. Deze resultaten geven aan dat bij de 20- en 40 nm standaarden het NMI hooguit enkele nanometers verschilt met het gemiddelde van de 'beste laboratoria'. Bij de '900 nm' kogel was dit minder dan 10 nm; hiervoor geldt echter een andere onzekerheidsberekening dan de bovenstaande.

Een tweede bevestiging van de berekende onzekerheid werd gevonden uit een ringvergelijking met Taiwan: als object diende hierbij een glazen halve bol waarbij een rondheidsafwijking werd gemeten van 9 nm. Het is uiterst onwaarschijnlijk dat een zo kleine rondheidsafwijking kan worden gemeten indien de onzekerheid van de meetmethode groter is.

Deze ringvergelijkingen geven een on-

afhankelijke bevestiging van het feit dat nu rondheidsmetingen mogelijk zijn met een onzekerheid van rond circa 10 nm.

Conclusie

De in dit artikel besproken methode voor de kalibratie van rondheidsstandaarden en zeer vormzuivere objecten leidt tot een herleidbare meting met een onzekerheid in de rondheidsafwijking van maximaal 12 nm. De onzekerheid is in ringvergelijkingen bevestigd en is vergelijkbaar met het best haalbare in andere standaardinstituten. De kalibratie is beperkt tot standaarden waarbij de rondheidsafwijking bepaald wordt door harmonische componenten met een frequentie beneden circa vijftig golven per omwenteling.

Literatuur

- [1] J D Whitehouse, A best fit reference line for use in partial arcs, *Journal of Physics E* 6(1973) pp 921 - 924
- [2] J W van Beek, Harmonische analyse bij rondheidsmetingen, *Mikroniek* 2(1993) pp 49 - 52, 1993
- [3] NEN-ISO 4291, Meting van variaties in straal, NNI, 1987
- [4] R Thalmann en J Spiller, Rundheitsmessung mit Nanometer-Genauigkeit, OFMET-info 2(1994) pp 10 - 13
- [5] A Leistner and W Giardini, Fabrication and testing of Precision Spheres, *Metrologia* 28(1992) pp 503-506
- [6] A Sacconi, Intercomparison of high accuracy roundness measurements, BCR information applied metrology, Report EUR 14662 EN, Brussel, 1993
- [7] Guide to the expression of uncertainties, ISO, Geneva (1993) ISBN 32-67-10188-9

Auteursnoot

De auteur, Dr H Haitjema is als wetenschappelijk medewerker werkzaam bij het Nederlands Meetinstituut, Van Swinden Laboratorium BV, Afdeling Fysische Standaarden te Delft