

## Rundheitsmessung mit Nanometer-Genauigkeit

Rudolf Thalmann, Jürg Spiller

Ein wichtiger Bereich der dimensionellen Messtechnik ist die Formmessung. Dabei müssen vor allem Formabweichungen, wie sie in der Norm ISO 1101 mit Hilfe von Toleranzzonen beschrieben sind, geprüft werden können; insbesondere Abweichungen von den Grundformen wie Geradheit, Ebenheit, Rundheit, Zylinder- und Kugelform. Im vorliegenden Beitrag wird beschrieben, wie Rundheitsabweichungen am EAM mit einer Unsicherheit von wenigen Nanometern gemessen werden.

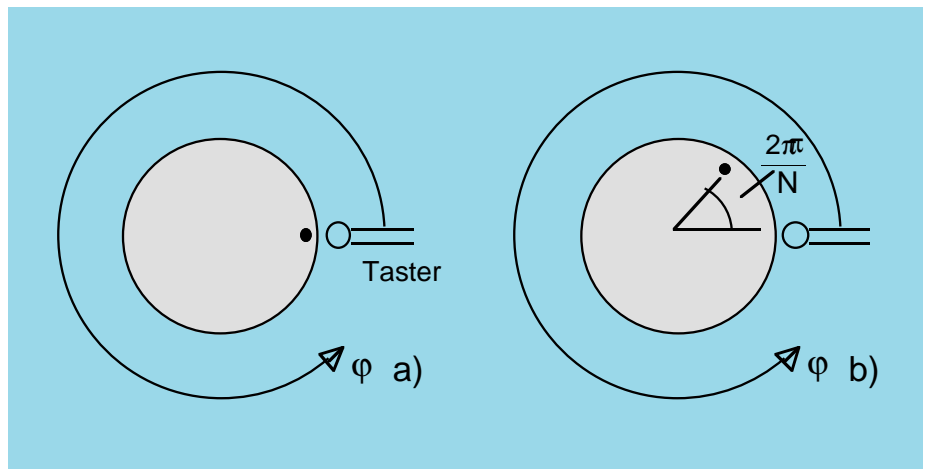
Rundheitsmessungen werden vor allem zur Kalibrierung von Lehren für die Längenmessung (Lehrdorne, Lehrringe), von Formkörperungen (Prüfzylinder), von Tastelementen (Kugeltaster), von Normalen für die Formprüfung (Präzisionskugeln oder Hemisphären) und von Volumennormalen benötigt. Die Genauigkeitsanforderungen liegen für Lehren und Prüfzylinder im Bereich von 0.1  $\mu\text{m}$ , für Präzisionskugelnormale sind sie noch etwa zehnmal höher (10 nm).

### Messverfahren

Rundheitsmessmaschinen basieren auf kreisförmiger, mechanischer Antastung des Prüfkörpers, in der Regel durch einen Kugeltaster mit induktivem Wegaufnehmer. Man unterscheidet dabei grundsätzlich zwei verschiedene Messanordnungen:

1. Drehender Prüfkörper und ortsfester Taster.
2. Ruhender Prüfkörper und rotierendes Tastelement.

Beide Anordnungen haben, je nach Anwendung, ihre Vor- und Nachteile. Das EAM besitzt von jedem Typ ein Gerät: Einerseits eine numerisch gesteuerte Formmessmaschine (Talyron 300) mit luftgelagertem Drehtisch zur Aufnahme des Prüfkörpers sowie vertikaler und horizontaler Achse zur Messung von Rundheit, Geradheit und Zylinderform. Dieses Gerät wird vor allem für die Formprüfung



**Figur 1: Rundheits-Messobjekt mit rotierendem Taster in seiner ursprünglichen a) und zweiten b) Drehlage beim Drehschritt-Fehlertrennverfahren**

von zylindrischen Lehren verwendet. Andererseits eine Rundheitsmessmaschine (Talyron 73) mit rotierendem Taster, dessen Präzisionsspindel ölhydrostatisch gelagert ist. Infolge der guten Rundlaufeigenschaften der Messspindel wird dieses Gerät für Messungen höchster Genauigkeit verwendet, wie unten beschrieben.

Allen Formmessungen gemeinsam ist die Tatsache, dass es kein Primärnormal gibt, sondern die Grundformen durch die Euklid'sche Geometrie mathematisch definiert sind. Die *Abweichungen* von der Idealform hingegen werden in der Längeneinheit ausgedrückt und müssen auf die Meterdefinition rückführbar sein. Eine fehlerfreie Formmessung erreicht man unter Ausnützen von Symmetrieeigenschaften. Dies sei am Beispiel der Geradheitsmessung erklärt.

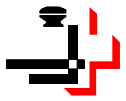
Die Gerade zeichnet sich durch ihre achsiale Symmetrie aus, d.h. sie geht bei einer Drehung oder Spiegelung um ihre Längsrichtung in sich selbst über. Bei der sogenannten Umschlagsmethode vergleicht man die zu prüfende Geradheitskörperung mit einem Normal, und zwar in zwei einander entgegengesetzten Ausrichtungen, so dass die Fehler des Normals mit unterschiedlichem Vorzeichen in die zwei Messungen eingehen und sich somit arithmetisch von den Formabweichungen des Prüflings trennen lassen. Bei Messverfahren mit Fehlertrennung ist die Genauigkeit nur

noch von der Stabilität des Messaufbaus, der Wiederholbarkeit und der Linearität und Auflösung des Tasters abhängig.

Für die Rundheitsmessung wird die Rotationssymmetrie ausgenützt, d.h. die Tatsache, dass ein Kreis in sich selbst übergeht, wenn man ihn um seinen Mittelpunkt dreht. Im sogenannten Drehschritt-Verfahren [1] wird der Prüfkörper in einer Vielzahl von verschiedenen Drehlagen gemessen. In der Messanordnung mit ruhendem Prüfkörper und drehender Messspindel wird also zwischen zwei Rundheitsmessungen der Prüfling jeweils um einen ganzzahligen Bruchteil einer Umdrehung gedreht (Fig.1). Geht man davon aus, dass die Fehler der Messspindel ortsfest sind, die zu messenden Rundheitsabweichungen jedoch mit dem Prüfling mitgedreht werden, lassen sich dadurch die Objektfehler und Spindelfehler unterscheiden und voneinander trennen.

### Drehschritt-Fehlertrennverfahren

Im folgenden sei das vom EAM angewendete Fehlertrennverfahren mathematisch beschrieben. Eine Rundheitsprofilauflösung kann man als zyklische Funktion betrachten. Es ist daher natürlich, sie in ihre Wellenanteile oder harmonischen Funktionen zu zerlegen. Eine derartige Zerlegung



findet z.B. auch in der Filterung von Rundheitsmessungen ihre Anwendung, wo die Grenzfrequenz oder der sogenannte „cutoff“ als Anzahl Wellen pro Umfang angegeben wird. Die Zerlegung des gemessenen Profils  $f(\varphi)$  in seine harmonischen Wellenanteile (Fourier-Reihenentwicklung) lautet

$$f(\varphi) = f_0 + \sum_{m=1}^{\infty} f_m \cos(m\varphi) + \sum_{m=1}^{\infty} \bar{f}_m \sin(m\varphi)$$

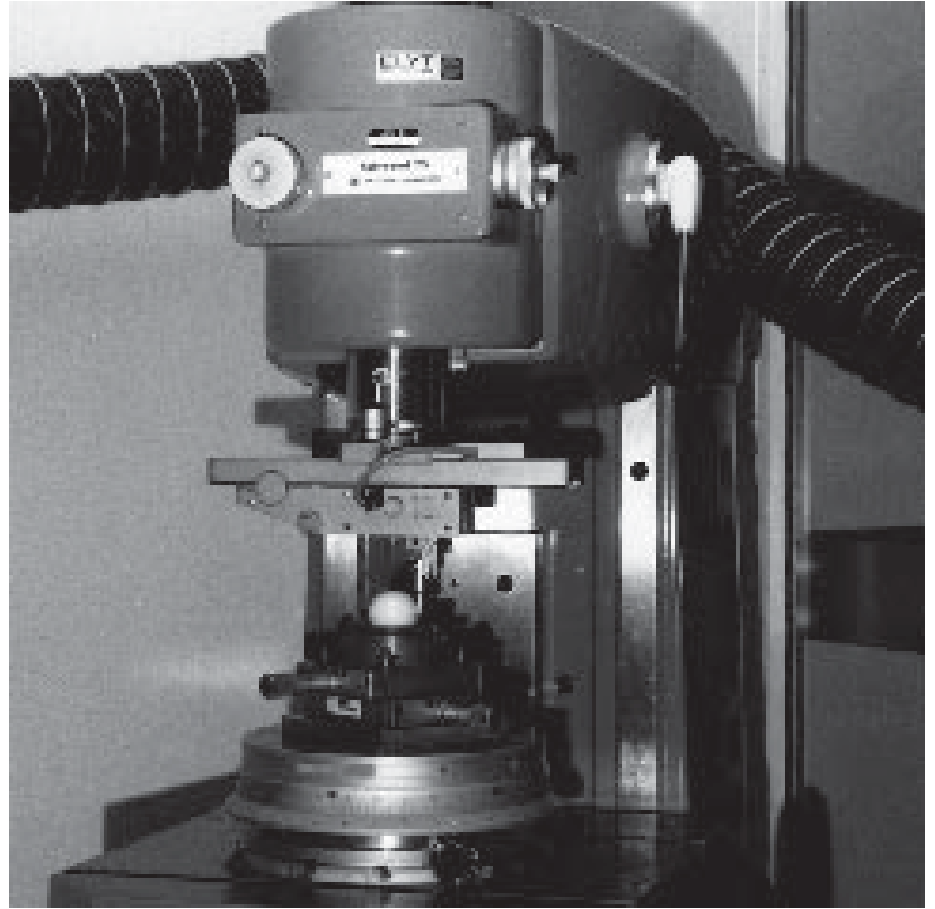
wobei  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$  der Drehwinkel bedeutet und  $f_0$ ,  $f_m$  und  $\bar{f}_m$  die Fourierkoeffizienten der Funktion  $f(\varphi)$  sind. Das aufgezeichnete Profil  $f(\varphi)$  setzt sich aus dem Spindelfehler  $g(\varphi)$  und der Rundheitsabweichung des zu messenden Prüflings, dem Komponentenfehler  $h(\varphi)$  zusammen:  $f(\varphi) = g(\varphi) + h(\varphi)$ . Die Funktion  $f(\varphi)$  wird nun für  $N$  regelmässig auf eine ganze Umdrehung verteilte Drehlagen des Prüfkörpers gemessen (Fig. 1). Die Anzahl  $N$  liegt typischerweise in der Größenordnung von 10. Während der Spindelfehler innerhalb seiner Wiederholbarkeit bei jeder Messung gleich bleibt, verschiebt sich der Komponentenfehler beim Drehen des Prüfkörpers um  $2\pi/N$ . Die  $n$ -te Messung wird wie folgt beschrieben:

$$f_n(\varphi) = g(\varphi) + h\left(\varphi - n \cdot \frac{2\pi}{N}\right)$$

Berechnet man nun den Mittelwert aller gemessenen Profilaufzeichnungen  $f_n(\varphi)$ , so erhält man:

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f_n(\varphi) &= g(\varphi) + h_0 \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{\infty} h_m \sum_{n=1}^N \cos\left[m\left(\varphi - n \cdot \frac{2\pi}{N}\right)\right] \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{\infty} \bar{h}_m \sum_{n=1}^N \sin\left[m\left(\varphi - n \cdot \frac{2\pi}{N}\right)\right] \end{aligned}$$

Die die cos- und sin-Funktion enthaltenden Summen ergeben Null, ausser für Indizes  $m$ , die ganzzahlige Vielfache von  $N$  sind. Um dies anschaulich zu verstehen, stelle man sich ein Profil mit einer Anzahl  $m$  Wellen pro Umfang vor, das  $N$ -mal gedreht wird. Ist  $m = N$  (oder ein Vielfaches), erfolgt die Drehung jeweils um genau eine Welle, die sich bei der Mittelwertbildung alle gleichphasig überlagern und somit nicht ausgemittelt werden können. In allen anderen Fällen heben sie sich



**Figur 2: Rundheitsmessmaschine mit rotierender Spindel und zusätzlichem Indexrundtisch zur schrittweisen Rotation des Messobjekts (Kugel).**

gegenseitig auf. Mathematisch ausgedrückt heisst das:

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f_n(\varphi) &= g(\varphi) + h_0 \\ &+ \sum_{k=N}^{\infty} h_k \cos(k\varphi) + \sum_{k=N}^{\infty} \bar{h}_k \sin(k\varphi), \end{aligned}$$

Wobei  $k = N, 2N, 3N, \dots$

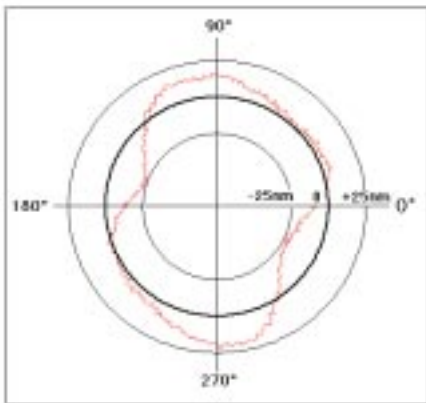
Der so berechnete Mittelwert enthält folglich nur noch höhere harmonische Glieder. Vorausgesetzt, dass die  $N$ -ten harmonischen Anteile des Komponentenfehlers vernachlässigbar sind, ergibt sich damit bis auf einen konstanten Anteil  $h_0$  der Spindelfehler. Das beschriebene Verfahren lässt sich auch mit entsprechender Ausmittlung des Spindelfehlers zur Bestimmung des Komponentenfehlers anwenden. Je nach Qualität des zu messenden Teils hat das eine oder das andere Verfahren seine Vorteile.

Das Fehlertrennverfahren kann somit nur erfolgreich sein, falls entweder das Messobjekt oder der Spindelfehler keine hochwelligen Anteile enthalten,

d.h. keine feinen Strukturen, deren höhere harmonische Wellenanteile nicht kompensiert werden können. Dies ist in der Regel bei Präzisionsspindeln oder -normalen der Fall.

## Rundheitsmessung am EAM

Das Drehschritt-Verfahren wurde am EAM auf der Rundheitsmessmaschine Talysurf 73 implementiert (Fig. 2). Das Drehspindel-Messgerät wurde durch den Hersteller für eine elektronische Erfassung und Auswertung der Messdaten aufgerüstet. Die Mechanik und das Pickup (digitale Auflösung 1 nm) blieben unverändert. Ein Indexrundtisch ermöglicht die Drehung des Messobjekts in seine verschiedenen Drehlagen. Ein zweiachsiger Verschiebetisch erlaubt das Zentrieren des Objektes zum Rundtisch. Die Drehlage der Spindel wird über das Auslösen eines Schalters in der Nulllage und basierend auf einer gleichförmigen Bewegung erfasst. (Die direkte Messung der Drehlage durch einen Drehgeber würde für eine korrekte



**Figur 3: Spindelfehler des verwendeten Rundheitsmessgerätes, ermittelt mit dem Drehschritt-Fehlertrennverfahren**

Fehlertrennung sicherlich Vorteile bieten, wurde aber aus Gründen des erheblich grösseren Aufwandes nicht realisiert).

Die Auswertung der Rundheitsmessdaten erfolgt durch die Software Talydata 2000 auf einem PC. Für das Multistep-Fehlertrennverfahren wurde zwischen die Datenerfassung und die Standardauswertung ein selbst entwickeltes Programmpaket geschaltet.

Vor einer Messung läuft die Spindel während mindestens einem Tag, um eine möglichst gleichförmige Drehung zu garantieren. Die Drehbewegung wird während des gesamten Messvorganges nie unterbrochen. In jeder der normalerweise 10 Drehlagen des Messobjektes werden je 3 bis 5 Rundheitsprofile aufgenommen. Die

Messungen werden mit hoher Auflösung graphisch überlagert und visuell auf allfällige Driften und Ausreisser beurteilt. Danach erfolgt eine Mittelung in jeder Position und anschliessend die Auswertung des Spindelfehlers. Auch wenn dieser Fehler mit der Zeit geringfügigen Änderungen unterworfen ist, lässt sich daraus doch die Qualität der Messung beurteilen. Figur 3 zeigt eine Auswertung des Spindelfehlers, dessen Rundlauf ca. 50 nm beträgt.

### Unsicherheitsabschätzung

Die Abschätzung der Unsicherheit ist bei einem Messverfahren mit Fehlertrennung sehr schwierig, da sich die Fehler bis auf statistische Schwankungen praktisch eliminieren sollten. Die wichtigsten Fehlerquellen sind:

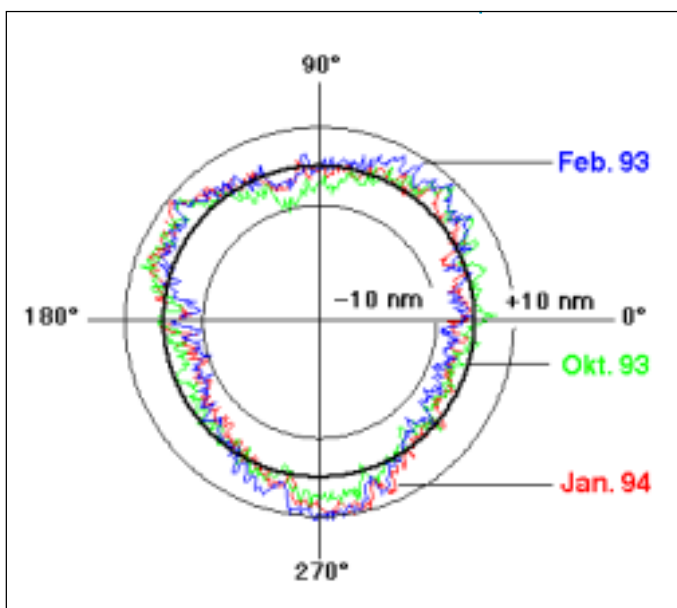
- Rauschen und Digitalisierungsfehler des Tastersignals
- Wiederholbarkeit der Spindel, Stabilität des Aufbaus
- Unsicherheit der Drehlage der Spindel → ungenügende Spindelfehlerkorrektur
- Kalibrier- und Linearitätsfehler des Tasters
- Stabilität des Messobjektes (Verformung durch Temperaturgradienten, andere äussere Einflüsse und Alterung).

Die ersten beiden Fehlerquellen lassen sich statistisch abschätzen und unter entsprechend guten Bedingungen durch Mittelung über eine grosse Anzahl von Messungen vermindern.

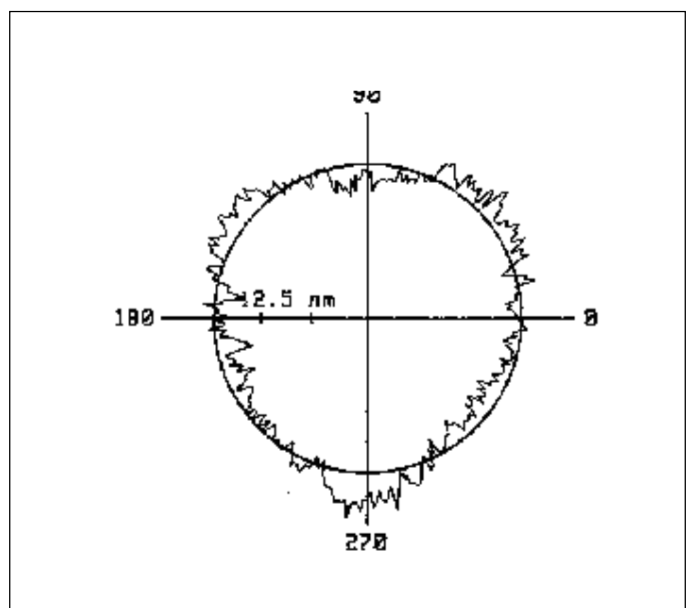
Die Auswirkungen der 3. und 4. Fehlerquelle hängen wesentlich von der Formabweichung des Prüflings ab und verschwinden praktisch, falls dessen Rundheit nahezu perfekt ist. Die letzte Einflussgrösse ist nicht vom Messgerät abhängig, sondern von den Umgebungsbedingungen und der Formstabilität des Normals. In diesem Grenzbereich der Genauigkeit fehlt allerdings eine diesbezügliche Erfahrung. Es muss zudem unterschieden werden, ob die Unsicherheit sich auf die gesamte Rundheitsabweichung (Minimum-Maximum-Wert eines gemessenen Profils) oder auf einzelne Profilpunkte bezieht. Für die nachstehend wiedergegebene Kugelmessung wurde eine kombinierte Messunsicherheit [2] von  $U_{95} = \pm 6 \text{ nm}$  abgeschätzt. Als anschaulicher Vergleich dazu sei erwähnt, dass 6 nm Formabweichung auf einer Kugel mit 72 mm Durchmesser einem 1 m hohen Erdhaufen auf dem Erdball entsprechen.

### Messvergleich

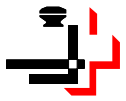
An einer Präzisionskugel aus Zirkonoxid-Mischkeramik [3] wurden dreimal innerhalb eines Jahres Rundheits-



**Figure 4: Drei zeitlich um mehrere Monate verschobene Rundheitsmessungen des EAM an der Keramikkugel EAM+92L02**



**Figur 5: Rundheitsmessung des IMG C, Turin, an der Keramikkugel EAM+92L02**



messungen höchster Genauigkeit durchgeführt (Fig.4). Die Berechnung der Abweichung von der Rundheit erfolgte dabei nach der Norm ISO 4217 und ist definiert als der kleinste Abstand zweier zum Ausgleichskreis konzentrischer Kreise, die alle Punkte des gemessenen Profils miteinschließen. Der Ausgleichskreis wurde nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Die ermittelten Rundheitsabweichungen sind in der Tab.1 zusammengefasst. Die Unterschiede der drei Messprofile (verschiedene Farben) betragen in einzelnen Punkten einige Nanometer. Es ist nicht klar, ob diese Unterschiede auf Änderungen der Form oder auf Messfehler

zurückzuführen sind. Tatsache ist, dass die Wiederholbarkeit innerhalb einiger Tage mehrfach besser ist, als es die Fig.4 zeigt. Im Dezember 1992 wurde die Kugel zudem auch vom italienischen Metrologieinstitut [4] ge-

messungen (Fig.5). Die Übereinstimmung ist sehr gut, beträgt doch der Unterschied nur wenige Nanometer und liegt damit weit innerhalb der angegebenen Messunsicherheiten (Tab.1). ■

Datum	EAM	IMGC
Dez. 1992		(20 ± 7) nm
Feb. 1993	(19 ± 6) nm	
Okt. 1993	(20 ± 6) nm	
Jan. 1994	(23 ± 6) nm	

**Tabella1: Risultate von Rundheitsmessungen an der Keramik-Kugel EAM+92L02 durch das EAM und das italienische Staatsinstitut IMGC**

Literatur

[1] D.J. Whitehouse, „Some Theoretical Aspects of Error Separation Techniques in Surface Metrology“, J. of Phys. E: Scient. Instr. 9, 531-536 (1976).  
 [2] Guide to the Expression of Uncertainty, ISO, Geneva, (1993) – ISBN 32-67-10188-9  
 [3] ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TZP-HIP Mischkeramik, Durchmesser 32 mm, hergestellt von der Firma Saphirwerk Industrieprodukte AG, CH-2555 Brügg.  
 [4] Mit freundlicher Genehmigung von Dr. A. Sacconi, Istituto di Metrologia „G. Colonnetti“, (IMGC), Turin.

**Kurzfassung**

Das Erfassen von Rundheitsabweichungen spielt in der dimensionellen Messtechnik eine zentrale Rolle, werden doch zahlreiche Lehren durch kugel- oder zylinderförmige Normale verkörpert. Formmessungen höchster Genauigkeit werden nicht auf ein Primärnormal zurückgeführt, sondern es werden Verfahren angewendet, bei denen die Fehler des Messinstrumentes von den Fehlern des zu messenden Körpers getrennt werden. In der Rundheitsmessung erreicht man eine solche Fehlertrennung z.B. durch das Drehschrittverfahren, bei dem der Prüfkörper in mehreren Drehlagen gemessen wird. Durch die rechnerische Verarbeitung sämtlicher digital aufgezeichneter Rundheitsprofile lassen sich die Rundlauffehler der Messspindel von den Rundheitsabweichungen des Prüfkörpers separieren. Dadurch können Messunsicherheiten von wenigen Nanometern (Millionstel-Millimeter) erzielt werden, wie dies durch das Resultat einer Vergleichsmessung an einer Keramikugel illustriert wird.

**Résumé**

La mesure de circularité joue un rôle central en métrologie dimensionnelle, puisque de nombreux étalons sont de forme sphérique ou cylindrique. Les mesures de forme de haute précision ne peuvent être raccordées à un étalon primaire, aussi on applique des méthodes qui permettent de séparer les erreurs de l'instrument de mesure des erreurs de l'objet à mesurer. Pour la circularité une telle séparation d'erreurs est obtenue par la mesure de l'objet en plusieurs différentes positions angulaires. Par un dépouillement adéquat de tous ces profils de circularité, enregistrés de façon digitale, on arrive à séparer les erreurs de rotation de la broche de mesure des écarts de circularité de l'objet. Ainsi on peut arriver à des incertitudes de quelques nanomètres (millionième de millimètre), ce qui est illustré par le résultat d'une intercomparaison de mesure de circularité.

**Sommario**

Il rilevamento della deviazione dalla circolarità svolge funzione centrale nella tecnica dimensionale di misurazione poiché parecchi campioni sono di forma sferica o cilindrica. Le misurazioni di forme, di massima precisione, non sono ricondotte a un campione primario, bensì si svolgono con un procedimento che separa gli errori dello strumento di misurazione da quelli del corpo sottoposto a misurazione. Nella misurazione di circolarità si attua simile separazione degli errori, per esempio mediante procedimento del passo torsionale, con cui il corpo da esaminare viene misurato in più posizioni di rotazione. Mediante elaborazione aritmetica dell'insieme dei profili di circolarità, registrati digitalmente, si possono separare gli errori di oscillazione del mola di misura dalla deviazione dalla circolarità del corpo da esaminare. In tal modo è possibile raggiungere incertezze di misurazione di pochi nanometri illustrati dal risultato di una misurazione comparativa applicata a una sfera di ceramica.

**Summary**

Roundness measurement plays an important role in dimensional metrology, since numerous gauges are materialized by spherical or cylindrical standards. Form measurements of highest accuracy are not traceable to a primary standard, but procedures are applied, where the errors of the measuring instrument are separated from the errors of the object to be measured. In roundness measurement, such an error separation is achieved e.g. by the multi-step method, where the object is measured in several different angular positions. Through a computational evaluation of all the digitally recorded roundness profiles, the running error of the measurement spindle may be separated from the departure from roundness of the object. Using such methods, measurement uncertainties of a few nanometers (millionth of a millimeter) can be achieved. This is illustrated by the result of an intercomparison of roundness measurement on a ceramic sphere.