

Geradheits- und Rechtwinkligkeitsmessung am EAM

Rudolf Thalmann

Die Kalibrierung von Formnormalen für Geradheit und Rechtwinkligkeit wie Lineale, Prüfsäulen oder Hartgesteins-Winkelnormale gehört zu den standardmässigen Aufgaben eines Kalibrierlabors für Längenmessmittel. Solche Prüfkörper werden beispielsweise zur Überprüfung der Führungsfehler von Bearbeitungs- und Messmaschinen verwendet. Sie können selbst bei Abmessungen bis zu 1 m in Toleranzen unter 1 µm hergestellt werden. Die dazu erforderliche Messgenauigkeit für die Kalibrierung der Formabweichungen liegt in der Grössenordung von 0.1 µm, was bezüglich der verwendeten Messgeräte und -verfahren hohe Anforderungen stellt.

Das EAM hat kürzlich seine Einrichtungen für die Geradheits- und Rechtwinkligkeitsmessungen an Prüfkörpern entscheidend verbessert. Im vorliegenden Beitrag werden die zur Kalibrierung angewandten Fehlertrennverfahren erläutert, die verwendeten Messgeräte beschrieben und charakterisiert sowie die Messmöglichkeiten des EAM vorgestellt.

Geradheitsmessung

Definition der Geradheitsabweichung Die Geradheitsabweichung einer Linie kann nach zwei verschiedenen Definitionen angegeben werden [1]. Die minimale Zone (MZ) einerseits ist durch zwei parallele Geraden definiert, die das gesamte Geradheitsprofil einschliessen und einen minimalen Abstand haben (Figur 1a). Die MZ-Definition entspricht auch der Toleranzzone nach ISO 1101. Die LS-Abweichung andererseits gibt den Abstand zweier Geraden an, die das gesamte Geradheitsprofil einschliessen und parallel zur Ausgleichsgerade liegen (Figur 1b). Die Ausgleichs-



Figur 1: Definition der Geradheitsabweichung.



Figur 2: STRAIGHT-line für die Geradheitsmessung von Prüfkörpern in horizontaler Lage und, in Kombination mit dem Winkelmesstisch, für die Kalibrierung von grossen Winkelverkörperungen.

gerade wird mit der Methode der linearen Regression ("least squares", LS) ermittelt. Heute wird meist mit der LS-Definition gearbeitet, da sie wesentlich einfacher zu berechnen ist und die Richtung der LS-Bezugslinie. nur unwesentlich durch Ausreisser im Messprofil (z.B. durch Schmutzpartikel) beeinflusst wird. Der zitierte Normenentwurf für die Geradheitsmessung [1] legt auch die Parameter der idealen Messvorschrift fest, so z.B. die Eigenschaften der anzuwendenden Profilfilter, die Anzahl nötiger Messpunkte und die Geometrie der zu verwendenden Taster.

Geradheitsmessgerät

Für die Geradheitsmessung von Prüfkörpern in horizontaler Lage wird ein STRAIGHT-*line®* Messgerät [2] verwendet. Dieses besteht aus einem 1000 mm langen Hartgesteinsbalken mit einem Vakuum-Luftlager-Schlitten mit 800 mm Verfahrweg (Figur 2). Der Schlitten wird mit einem numerisch gesteuerten DC-Motor über eine Stahlsaite angetrieben. Die Schlittenposition wird mit Hilfe eines Inkrementalmassstabes gemessen. Die Geradheitsabweichung des Prüfkörpers wird in horizontaler Antastrichtung mit einem induktiven Taster gemessen.

Fehlertrennverfahren

Für den Metrologen haben die Messgrössen Form und Winkel die gemeinsame Eigenschaft, dass es dafür eigentlich keine Primärnormale gibt, sondern für hochgenaue Messungen stets Selbstkalibrierverfahren oder Fehlertrennverfahren angewandt werden oder wenigstens die Messungen letzlich auf solche Verfahren rückführbar sein müssen. Solche Verfahren wurden im OFMETInfo sowohl für die Rundheitsmessung [3] als auch für die Winkelmessung [4] bereits vorgestellt. Es geht im Wesentlichen stets darum, in entsprechenden Konfigurationen mehrfache und damit überbestimmte Messungen durchzuführen, die es erlauben, die Abweichungen ("Fehler") des Messgerätes von den Abweichungen des Prüflings zu trennen. Bei Formmessungen sind das Abweichungen von der Idealform, also beispielsweise von einem ideal-geometrischen Kreis oder einer Gerade. Das für Geradheitsmessungen meistens angewandte Fehlertrennverfahren ist die wohlbekannte Umschlagsmessung. Der Führungsfehler des Geradheitsmessgerätes sei mit der Abweichungsfunktion $s_1(x)$ und die Geradheitsabweichung des Prüflings (Lineal) mit $s_2(x)$ beschrieben.



Figur 3: Zwei Konfigurationen (a) und (b) für die Geradheitsmessung mit Umschlag.

Für die Kalibrierung werden zwei Messungen mit dem Lineal in Normalposition (Figur 3a) und nach Umschlag (Figur 3b) durchgeführt, wobei die Profilfunktionen

$$P_{a}(x) = s_{2}(x) - s_{3}(x) \text{ und}$$
 (1a)
 $P_{a}(x) = s_{2}(x) + s_{3}(x)$ (1b)

aufgezeichnet werden. Der Mittelwert beider Profilfunktionen ergibt die Geradheitsabweichung des Lineals, die halbe Differenz ergibt den Führungsfehler des Messgerätes:

 $s_{2}(x) = \frac{1}{2} \left[p_{b}(x) + p_{a}(x) \right] \text{ und}$ (2a) $s_{a}(x) = \frac{1}{2} \left[p_{a}(x) - p_{a}(x) \right].$ (2b)

$$S_1(X) = \frac{1}{2} \left[\rho_b(X) - \rho_a(X) \right].$$

Letztere Funktion kann bei genügender Stabilität des Messgerätes und des Lineals sowie bei genügend guter Oberfläche (kleiner Rauschanteil) als Kalibrierfile des Geradheitsmessgerätes numerisch abgespeichert werden, was spätere Geradheitsmessungen ohne Umschlagsmessung ermöglicht.

Charakterisierung des Geradheitsmessgerätes

Für die Charakterisierung der Geradheitsmessung mit dem STRAIGHT-*line* wurden folgende Einflussfaktoren untersucht:

Rauschen: Der Rauschanteil des Messgerätes (Führung, Vakuum-Luftlager, Taster) wurde durch Messung einer optisch polierten Oberfläche auf 2 nm rms bei einem Filter von 1 mm Wellenlänge (cut-off) bestimmt.

Stabilität: Die Stabilität des Messaufbaus (zusammen mit dem Prüfling, in diesem Fall das weiter unten beschriebene Keramiklineal) wurde aus einer Serie von wiederholten Umschlagsmessungen ermittelt. Neben den zufälligen Abweichungen zwischen zwei wiederholten Messungen, die auf das Rauschen und die nicht reproduzierbare Mikrostruktur zurückzuführen sind, wurden langwellige Abweichungen festgestellt, deren obere Grenze in grober Näherung durch 5·10⁻⁸·*L* abgeschätzt werden kann, was für ein Lineal von 1 m Länge einer Geradheitsabweichung von 50 nm entspricht. Solche Abweichungen können durch mechanische Instabilitäten und Temperaturgradienten verursacht werden.

Temperatureinfluss: Ein nicht vollständig ausgeglichener Temperaturgradient im Prüfkörper erzeugt eine Deformation Δh desselben, die bei einem gleichförmigen transversalen Gradienten ΔT eines Lineals der Länge L und der Breite *B* durch die Funktion

$$\Delta h = L^2 \cdot \alpha \cdot \Delta T / (8B)$$

beschrieben werden kann, wobei α der thermische Ausdehnungskoeffizient des Lineals ist. Für oben erwähntes Keramiklineal mit einer Länge von 1000 mm und einer Breite von 95 mm verursacht ein Temperaturgradient von 0.01 °C eine Krümmung von 1 μm!

Zur Illustration der Genauigkeit des Messverfahrens wurde ein Keramik-



Figur 4: Führungsabweichung des Geradheitsmessgerätes (links) und Geradheitsabweichung des kalibrierten Keramiklineals (rechts), ermittelt aus einer Umschlagsmessung.



Figur 5: Zwei verschiedene Rechtwinkligkeits-Definitionen.

lineal (Abmessungen 1000 mm × 95 mm × 60 mm) des gleichen Herstellers [2] mit dem Geradheitsmessgerät in den Positionen wie in Figur 3 gezeigt auf einer zentralen Messlinie von 800 mm Länge gemessen. Figur 4 zeigt links den so erhaltenen Führungsfehler des Geradheitsmessgerätes, der anschliessend in einem Korrekturfile abgespeichert wurde, und rechts unten die Geradheitsabweichung des Keramiklineals, die lediglich 62 nm beträgt.

Rechtwinkligkeit

Definition der Rechtwinkligkeitsabweichung

Auch für die Kalibrierung von Hartgesteins-Winkelnormalen eignen sich, je nach Anwendung, zwei verschiedene Definitionen für die Rechtwinkligkeit. Die Definition für die Rechtwinkligkeitstoleranz nach ISO 1101 bezieht sich auf die funktionale Verwendung der Normale in vertikaler Lage auf einer Prüfplatte. Sie ist definiert als der Abstand zweier zur Bezugsebene rechtwinkliger, paralleler Ebenen, die alle Punkte der freien Messfläche einschliessen (Figur 5a). Die Bezugsebene ist durch die Auf-



lagefläche (Prüfplatte, auf der das Winkelnormal ruht) gegeben. In der Praxis beschränkt man sich meist auf die Bestimmung der Winkligkeit einer Geraden statt einer Ebene, z.B. der Mittellinie der Messfläche. Eine alternative Definition für die Rechtwinkligkeit ergibt sich aus dem Winkel zwischen zwei Ausgleichsgeraden durch die angrenzenden Messflächen (Figur 5b). Die Ausgleichsgeraden werden durch lineare Regression der Messprofile ermittelt. Während die erste Rechtwinkligkeits-Definition (a) in Längeneinheiten (in der Regel in µm) ausgedrückt wird und die Geradheitsabweichung der Messfläche miteinschliesst, wird in der zweiten Definition (b) die Rechtwinkligkeit in Winkeleinheiten (µm/m oder Bogensekunden) angegeben. Die Geradheitsabweichung muss dann allenfalls separat angegeben werden.

Rechtwinkligkeitsmessung mit STRAIGHT-line und Winkelmesstisch

Zur Bestimmung der Rechtwinkligkeit nach Definition (b) wird die Geradheits-Messeinrichtung mit dem Winkelmesstisch, einem numerisch gesteuerten Luftlager-Drehtisch mit hochgenauem Inkremental-Drehgeber [4], kombiniert (Figur 2). Dazu wird das Winkelnormal in horizontaler Lage auf den Drehtisch gelegt. Mit dem STRAIGHT-*line* werden die Geradheitsprofile zweier angrenzender Messflächen aufgezeichnet, nachdem dazwischen das Winkenormal um 90° gedreht wurde. Die RechtwinkligFigur 6: SQUARE-master für die Rechtwinkligkeitsmessung von Winkelnormalen in vertikaler Lage.

keitsabweichung erhält man rechnerisch aus der Steigung der beiden gemessenen Profillinien und dem genauen Drehwinkel.

Rechtwinkligkeitsmessung in vertikaler Lage

Mit Hilfe des SQUARE-master[®] [2] kann die Rechtwinkligkeit in vertikaler Lage entsprechend der Definition (a) nach ISO 1101 gemessen werden (Figur 6). Das Messgerät besteht aus einer 1200 mm hohen Granitsäule (Querschnitt 120 mm x 360 mm) mit einem Vakuum-Luftlagerschlitten mit einem Verfahrweg von 1000 mm. Der Schlitten wird mit einem DC-Motor über zwei symmetrisch angebrachte Stahlseiten angetrieben. Die Schlittenposition wird mit einem Inkrementalmassstab gemessen. Die Geradheitsabweichung des Messobjektes wird mittels eines am Schlitten befestigten induktiven Tasters aufgezeichnet. Der Schlitten ist so gebaut, dass

OFMET/mfo

der Taster auch an der gegenüberliegenden Seite der Säule angebracht werden kann (Figur 7c). Dies erlaubt die Anwendung eines speziellen Fehlertrennverfahrens. Die Verschiebung und Drehung der schweren Granitsäule auf der Prüfplatte wird durch ein im Fuss der Säule eingelassenes Luftlager erleichtert.

Fehlertrennverfahren

Das oben beschriebene Rechtwinkligkeitsmessgerät ermöglicht durch seine Konstruktion die Anwendung eines Fehlertrennverfahrens, bei dem alle unbekannten Fehlerkomponenten unabhängig voneinander ermittelt werden können, nämlich der Führungsfehler $s_1(z)$, die Geradheitsabweichung des Winkelnormals s2 (z), sowie der Neigungsfehler a, der Führung, die Rechtwinkligkeitsabweichung a, des Winkelnormals und der Winkelfehler a3, der durch die Ebenheitsabweichung der Prüfplatte hervorgerufen wird. In folgenden drei Konfigurationen (Figuren 7a, b, c) können Messprofile aufgenommen werden:

 $\begin{array}{l} p_{a}(z)=s_{2}(z)-s_{1}(z)+(\alpha_{2}+\alpha_{3}-\alpha_{1})\cdot z, \quad \mbox{(4a)}\\ p_{b}(z)=s_{2}(z)+s_{1}(z)+(\alpha_{2}-\alpha_{3}+\alpha_{1})\cdot z, \quad \mbox{(4b)}\\ p_{c}(z)=s_{2}(z)+s_{1}(z)+(\alpha_{2}+\alpha_{3}+\alpha_{1})\cdot z, \quad \mbox{(4c)}\\ \mbox{Durch Umschlag in den Positionen (a)}\\ \mbox{und (b) können die Unbekannten des}\\ \mbox{Winkelnormals bestimmt werden:} \end{array}$

$$S_2(z) + \alpha_2 \cdot z = \frac{1}{2} [\rho_b(z) + \rho_a(z).$$
 (5a)

Aus einer Umschlagsmessung in den Positionen (a) und (c) erhält man die Führungs- und Neigungsfehler des Messgerätes:

$$s_1(z) + \alpha_1 \cdot z = \frac{1}{2} [\rho_c(z) - \rho_a(z)].$$
 (5b)

Die durch die Ebenheitsabweichung der Prüfplatte erzeugte Neigung des Winkelnormals zum Messgerät kann



Figur 7: Vertikaler Messbalken in drei verschiedenen Positionen (a), (b) und (c) für die Kalibrierung von Rechtwinkligkeitsnormalen unter Anwendung von Fehlertrennverfahren.





Figur 8: Führungsabweichung des Rechtwinkligkeitsmessgerätes (links) und Geradheitsabweichung des Keramiklineals in vertikaler Lage (rechts), ermittelt aus einer Umschlagsmessung.

schliesslich aus den Messpositionen (b) und (c) ermittelt werden:

(5c)

 $a_3 \cdot z = \frac{1}{2} [pc(z) - pb(z)].$

Charakterisierung des Rechtwinkligkeitsmessgerätes

Für die Charakterisierung der Rechtwinkligkeitsmessung mit dem SQUA-RE-*master* wurden folgende Einflussfaktoren untersucht:

Rauschen: Der Rauschanteil des Messgerätes (Führung, Vakuum-Luftlager, Taster) wurde durch Messung einer optisch polierten Oberfläche auf 15 nm rms bestimmt. Dieser Rauschanteil könnte durch Einsatz eines besseren Messverstärkers für das Tastersignal wie beim Geradheitsmessplatz deutlich verbessert werden.

Stabilität: Die Stabilität des Messaufbaus wurde aus einer Serie von wiederholten Umschlagsmessungen mit einem Hartgesteinswinkelnormal ermittelt. Die Reproduzierbarkeit der Geradheitsmessung kann wiederum in grober Näherung durch 10⁻⁷·L abgeschätzt werden, was für ein Winkelnormal von 500 mm Seitenlänge einer maximalen Abweichung von 50 nm entspricht. Die Reproduzierbarkeit der Winkel a, und a, hängt im Wesentlichen von der Repositionierung des Püflings und allenfalls der Messsäule nach Umschlag ab und wurde experimentell auf 0.1* Standardabweichung abgeschätzt.

Temperatureinfluss: Der Einfluss der Temperatur ist, was den Messbalken betrifft, in den Stabilitätsmessungen bereits berücksichtigt. Ein allfälliger Temperaturgradient in einem Winkelnormal kann auf Grund der Abmessungen desselben in der Regel vernachlässigt werden.

Zur Charakterisierung und Kalibrierung der Messsäule SQUARE-master im gesamten Messbereich von 1000 mm wurde das Keramiklineal vertikal verwendet, nachdem dieses in einer eigens gefertigten, justierbaren Halterung genügend stabil gestellt werden konnte. Figur 8 zeigt das Ergebnis einer Umschlagsmessung mit dem Keramiklineal. Der Führungsfehler des Geradheitsmessgerätes (links) kann wiederum als Korrekturfile für spätere Messungen, wo das Umschlagsverfahren nicht angewendet wird, abgespeichert werden. Die Geradheitsabweichung des Keramiklineals, die bei horizontaler Lage des Lineals lediglich 0.06 µm betrug, hat sich in vertikaler Position auf 0.8 µm verschlechtert. Die Durchbiegung ist auf durch das Eigengewicht und leicht asymmetrische Lagerung erzeugte Kräfte zurückzuführen und lässt sich durch gezielte Veränderung der Auflagepunkte des Lineals reproduzierbar verändern.

Vergleichsmessung an Winkelnormal

Zum Vergleich der beschriebenen Messmethoden wurde ein Hartgesteins-Winkelnormal mit beiden Messgeräten kalibriert. Das Normal (Figur 6) hat die Abmessungen 500 mm x 350 mm x 60 mm und ist mit 5 symmetrisch verteilten Löchern mit Ø80 mm zur Gewichtsreduktion und besserer Handhabung versehen. Die beiden Messflächen wurden durch den Hersteller auf 1 µm Geradheitsabweichung und eine Winkelabweichung von unter 1" spezifiziert. Die Form beider Messflächen ist konkav, um eine stabile Lage des Normals auf dessen Messflächen zu sichern.

Figur 9 links zeigt die Geradheitsabweichung der längeren Messfläche des Winkelnormals in horizontaler Po-



Figur 9: Geradheitsabweichung der langen Messfläche des Hartgesteins-Winkelnormals in horizontaler (I.) und in vertikaler (r.) Lage.

6



Zur besseren Vergleichbarkeit der gemessenen Rechtwinkligkeitsabweichung in den beiden Lagen des Winkelnormals wurde in der horizontalen Lage der Winkel der LS Ausgleichsgerade der langen Messfläche auf eine Gerade, die von aussen an

das Messprofil der kurzen Messfläche angelegt wurde, bezogen, womit die Auflage des Normals auf eine Ebene simuliert wird. Der Winkel aus den Messungen in vertikaler Lage wurde nach der durch Gleichung (5a) beschriebenen Methode ermittelt. Die so für die Rechtwinkligkeitsabweichung erhaltenen Werte betragen (0.68 ± 0.16) " und (0.63 ± 0.20) " für die horizontale respektive vertikale Lage, was einer sehr guten Übereinstimmung entspricht. Damit kann auch die manchmal gestellte Frage, ob der Winkel eines Hartgesteins-Winkelnormals lageabhängig ist, wenigstens für symmetrisch gebaute Normale verneint werden.

Referenzen

[1] ISO/CD 12780-1:1998, Geometrical product specification (GPS) – Straightness – Part 1: Terms, definitions and parameters of straightness

OFME /mfd

[2] STRAIGHT-*line* und SQUARE-*master* sind eingetragene Markenzeichen der Firma Kunz Precision, CH-4800 Zofingen.

http://www.kunz-precision.ch.

[3] R. Thalmann, J. Spiller, *Rundheitsmessung mit Nanometer-Genauigkeit*, OFMETInfo Vol. 1(2), 1994.

[4] R. Thalmann, Winkelmessung am EAM, Teil 1: Einführung in die Winkelmesstechnik, OFMETInfo Vol. 3(2), 1996; und R. Thalmann, Winkelmessung am EAM, Teil 2: Einrichtung und Messmöglichkeiten, OFMETInfo Vol. 3(3), 1996.

e-mail: rudolf.thalmann@eam.admin.ch

Messmöglichkeiten am EAM

MESSGRÖSSE Instrument, Normal	Messbereich	Messunsicherheit (k = 2)
GERADHEIT Lineal, horizontale Lage Säule, Winkelnormal vertikale Lage	L ≤ 800 mm L ≤ 1000 mm	0.025 μm + 9·10 ^{-ε} . <i>L</i> 0.050 μm + 12·10 ^{-ε} . <i>L</i>
RECHTWINKLIGKEIT Winkelnormal, horizontale Lage Säule, Winkelnormal vertikale Lage	L ≤ 600 mm L ≤ 1000 mm	0.16" 0.20"

Kurzfassung

Hartgesteins-Winkelnormale werden in der Industrie hauptsächlich zur Überprüfung der Führungs- und Geometriefehler von Bearbeitungs- und Messmaschinen verwendet. Entsprechend den zwei verschiedenen Gebrauchslagen (horizontal liegend oder auf einer Messfläche stehend) kommen auch zwei verschiedene Definitionen für die Abweichung der Rechtwinkligkeit zur Anwendung. Am EAM stehen neu zwei verschiedene Messeinrichtungen zur Verfügung, die eine hochgenaue Kalibrierung von Geradheits- und Rechtwinkligkeitsverkörperungen in beiden Gebrauchslagen ermöglichen. Im vorliegenden Beitrag werden die zur Kalibrierung angewandten Fehlertrennverfahren erläutert, die verwendeten Messoeräte beschrieben und charakterisiert sowie die Messmöglichkeiten des EAM vorgestellt.

Les équerres en granite sont essentiellement utilisées dans l'industrie, pour la vérification des erreurs de quidage et de géométrie de machines outils, d'instruments et machines à mesurer. Selon les différentes positions d'utilisation (horizontale, ou posée verticalement sur une surface de mesure) différentes définitions sont appliquées pour l'écart de perpendicularité. Aujourd' hui, l'OFMET dispose de deux équipements différents permettant la mesure, avec une grande précision, d'étalons de rectitude et d'angle dans les deux positions d'utilisation. Dans cet article, les procédures appliquées pour la séparation des erreurs dans l'étalonnage sont expliquées, les instruments de mesure utilisés sont décrits ainsi que caractérisés, et les possibilités de mesure de l'OFMET sont présentées.

Résumé

Riassunto

I campioni angolari di granito sono principalmente adoperati nell'industria per verificare errori di guida e di geometria di macchine utensili, di strumenti e macchine per misurare. A seconda delle posizioni d'impiego (orizzontale o verticale su di una superficie di misura) vengono applicate differenti definizioni per lo scarto di perpendicolarità. Attualmente l'UFMET dispone di due diverse istallazioni per misurare, con elevata precisione, i campioni di rettilineità e di ortogonalità nelle due posizioni d'impiego. Nel presente articolo sono spiegate le procedure applicate per la separazione degli errori nella taratura, sono descritti e specificati gli strumenti di misurazione utilizzati e presentate le possibilità di misurazione dell'UFMET.

Summary

Granite angle standards are used in industry mainly for the verification of guidance and geometry errors of machine tools and measuring machines and instruments. According to the two different positions used (horizontal, and vertically standing on a measuring face), two different definitions of the deviation of rectangularity are applied. Since recently, OFMET is equipped with two measuring instruments providing a highly accurate calibration of straightness and angle standard in both positions of use. In this article, the errors separation techniques which are applied for the calibration are explained, the measuring instruments are described and characterised and the present measurement possibilities are given.